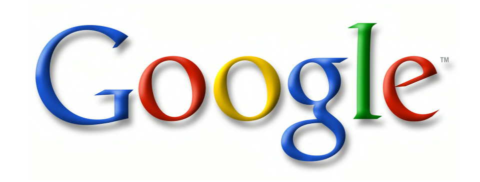
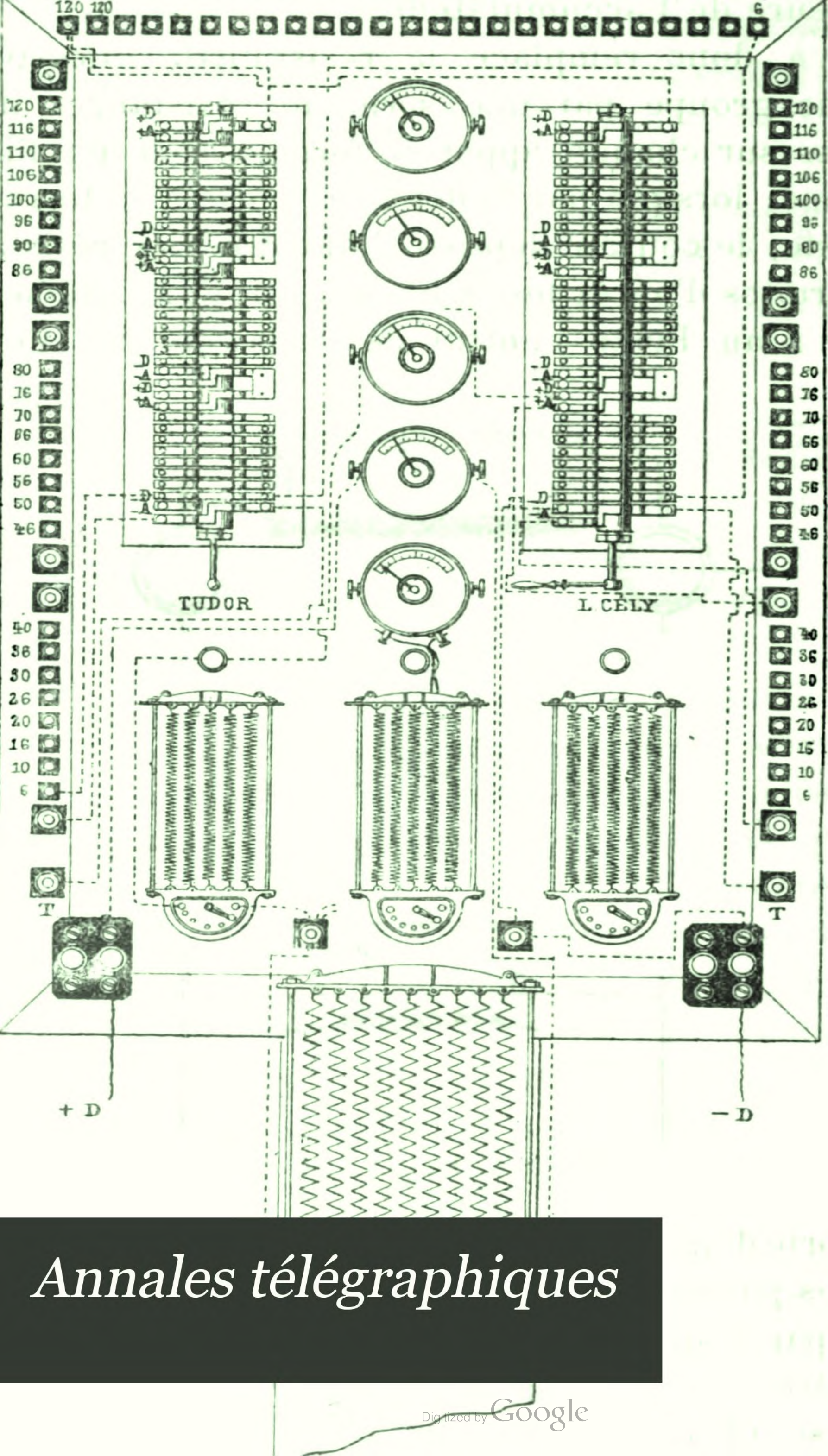




Annales télégraphiques




Annales



ANNALES
TÉLÉGRAPHIQUES

TROISIÈME SÉRIE

—

TOME ~~DIX-NEUVIÈME~~ Vingtième

PARIS

Vve Ch. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

Quai des Augustins, 49

—

1893

ANNALES
TÉLÉGRAPHIQUES

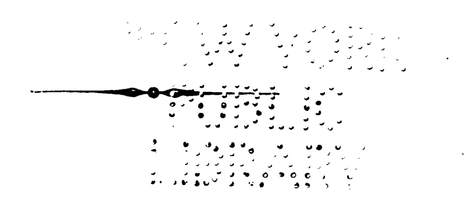
PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

ANNALES
TÉLÉGRAPHIQUES

TROISIÈME SÉRIE

TOME XX

Année 1893



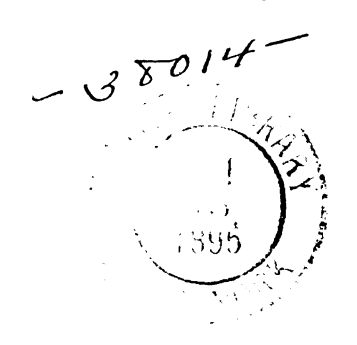
PARIS

V[ve] Ch. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

Quai des Augustins, 49

1893


-38014-

ANNALES
TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1893 **Janvier-Février**

SUR LA
DISTRIBUTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES
DANS LES RÉSEAUX DE CONDUCTEURS
PROPRIÉTÉ RÉCIPROQUE DE DEUX CONDUCTEURS

L'étude de la distribution des courants électriques dans un réseau de conducteurs contenant des forces électromotrices se fait très simplement en partant de deux théorèmes bien connus dus à Kirchhoff. L'une des propriétés les plus simples et les plus remarquables mises en évidence par cette étude est la loi de réciprocité suivante :

« Si dans un réseau de conducteurs on considère deux branches quelconques A et B, l'intensité du courant produit dans la branche B par une force électromotrice E placée dans la branche A est égale à l'intensité du courant produit dans la branche A par la même force électromotrice E placée dans la branche B. »

L'application la plus fréquente de ce théorème est celle que l'on fait au cas particulier où le réseau est un pont de Wheatstone. Choisissons comme branches A et B les deux diagonales MP et NQ du pont (*fig.* 1) : « Si les résistances des quatre côtés MN, NP, PQ, QM sont réglées de telle sorte qu'une force électromotrice placée dans la diagonale A ne produise aucun courant dans la diagonale B, réciproquement une force électromotrice placée dans la diagonale B ne produira aucun courant dans la diagonale A. »

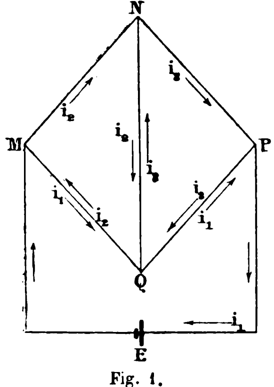


Fig. 1.

Ces théorèmes ont été démontrés dans le cas où le courant a atteint le régime permanent, c'est-à-dire conserve une intensité constante dans chaque branche du réseau. Mais lorsqu'on introduit des forces électromotrices dans le réseau, le courant n'atteint pas instantanément le régime permanent; il commence, au contraire, par varier pendant un temps plus ou moins long (période du régime variable), à cause des phénomènes de self-induction, d'induction mutuelle et même de capacité électrostatique que présentent les branches du réseau. Le régime variable peut même se prolonger indéfiniment si les forces électromotrices, au lieu d'être constantes comme celle d'une pile, varient avec le temps comme celle d'une machine à courants alternatifs, par exemple. Il y a intérêt à rechercher si la loi de réciprocité citée plus haut s'étend au cas général du régime variable du courant. Les calculs que nous développerons plus loin montrent que l'extension

de cette loi est légitime dans les conditions que nous allons définir.

Considérons un réseau quelconque constitué par un certain nombre de conducteurs ou branches MN, NP, ... ST reliant deux à deux des points d'embranchement M, N, P, ... T appelés sommets (*fig.* 2). Chaque branche possède une certaine résistance, une self-induction, et est soumise à l'induction des autres branches. En outre, des condensateurs peuvent être intercalés sur certaines branches MR, QT, ... On peut même, au lieu d'un seul réseau, en considérer plusieurs n'ayant entre eux aucune communication métallique et exerçant les uns sur les autres une induction mutuelle, ou reliés entre eux par des condensateurs; on aura alors un ensemble de réseaux. Le théorème suivant s'applique à deux branches A et B choisies d'une manière quelconque, soit dans un même réseau, soit dans deux réseaux différents :

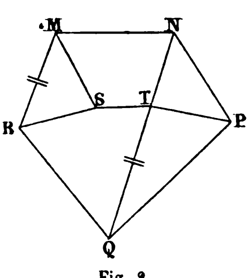


Fig. 2.

« Dans un réseau de conducteurs ou un ensemble de réseaux défini comme ci-dessus, si une force électromotrice constante ou variable $E = f(t)$ placée dans une branche A produit dans une branche B un courant d'intensité $i = \varphi(t)$, réciproquement la même force électromotrice E variant suivant la même loi $f(t)$ et placée dans la branche B produira dans la branche A un courant dont l'intensité i suivra la même loi $\varphi(t)$. »

Appliquons ce théorème à l'ensemble des trois réseaux MNP, AA'B'B, M'N'P' (*fig.* 3) reliés entre eux par deux bobines d'induction figurées en (AB, MP) et

A′B′, M′P′). Les réseaux MNP, M′N′P′ se réduisent, comme on le voit, à des circuits simples. Quant au réseau AA′ B′B, il affecte la forme d'une *ligne artificielle*, dont les deux côtés AA′ et BB′ sont reliés de

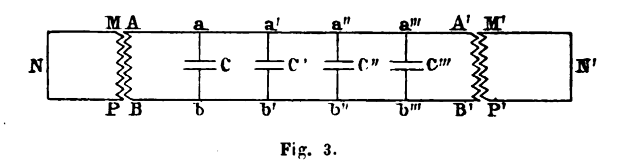


Fig. 3.

distance en distance par des condensateurs c, c', c'', c'''...; la répartition de ces condensateurs peut, du reste, n'être pas uniforme ni symétrique par rapport aux deux extrémités de la ligne A et A′. Ceci posé, étudions les cas suivants :

1° Une force électromotrice $E = f(t)$ est développée dans le circuit MNP, et l'on observe le courant i, par exemple, dans la branche $a'b'$, sur laquelle est intercalé le condensateur c'. Si la méthode d'observation permet d'enregistrer le courant i à des intervalles très rapprochés, on pourra construire une courbe représentant la loi de variation de ce courant avec le temps. Si ensuite la force électromotrice $E = f(t)$ est développée dans la branche $a'b'$ et que l'on observe le courant dans le circuit MNP, la nouvelle courbe que l'on construira sera exactement superposable à la première. Il est essentiel, bien entendu, que l'appareil dont on se sert pour enregistrer le courant n'apporte pas, par sa présence, une perturbation dans le régime même du courant.

2° Supposons qu'une force électromotrice périodique

$$E = E_0 \sin mt$$

soit développée dans le circuit MNP. Elle engendrera

dans le circuit M'N'P' un courant alternatif de même période $\frac{2\pi}{m}$, et dont l'intensité i variera suivant une loi de la forme :

$$i = i_0 \sin m(t - \theta).$$

Si inversement on développe dans le circuit M'N'P' la force électromotrice $E_0 \sin mt$, le courant produit dans le circuit MNP aura encore pour formule $i_0 \sin m(t - \theta)$; c'est-à-dire que le courant observé dans les deux cas a exactement la même intensité et la même différence de phase avec la force électromotrice E.

3° Supposons que l'on introduise dans le circuit MNP une force électromotrice constante E (au moyen d'accumulateurs électriques par exemple), le courant i développé dans une branche telle que A'B' aura une courte durée T. Considérons la quantité totale d'électricité $Q = \int_0^T idt$ qui aura parcouru cette branche.

Si ensuite la force électromotrice E est introduite dans la branche A'B', le courant i développé dans le circuit MNP variera exactement suivant la même loi, et la quantité totale Q' d'électricité qui aura parcouru MNP sera par conséquent égale à Q. — Pour généraliser ce résultat, on n'a qu'à remplacer, dans le théorème énoncé ci-dessus, l'intensité i par la quantité d'électricité $\int_0^t idt$.

Ces exemples suffisent pour montrer les applications possibles du théorème général de réciprocité énoncé plus haut. Toutefois, il convient de signaler, pour les éviter, de fausses interprétations de ce théorème que l'on pourrait être tenté de commettre.

En premier lieu, on pourrait supposer que, si l'on place une même pile successivement dans deux branches A et B d'un réseau, les intensités de courant observées successivement dans B et A sont égales en vertu du théorème en question. Mais le théorème ne s'applique évidemment pas si l'on n'a pas soin de maintenir constantes les résistances des branches A et B. Or, en enlevant purement et simplement la pile de A pour la transporter en B, on diminuerait la résistance de A et l'on augmenterait celle de B d'une valeur égale à la résistance de la pile.

En second lieu, s'il existe dans le réseau des organes mobiles sous l'action du courant, par exemple s'il y a un galvanomètre, un récepteur télégraphique ou un régulateur électro-magnétique de courant, le mouvement des organes réagit sur le courant lui-même. Comme, dans la démonstration du théorème, nous ne tenons point compte de cette réaction, le théorème n'est pas applicable à ce cas.

Enfin le théorème n'est pas applicable au cas où le réseau renferme des bobines à noyaux de fer présentant des effets sensibles de magnétisme rémanent ou d'hystérésis, car il n'est pas possible de tenir compte de ces effets dans des calculs rigoureux. Il en est de même si les condensateurs employés dans le réseau présentent des effets sensibles de charge résiduelle. En résumé, on a écarté des calculs, que l'on trouvera plus loin, les causes qui enlèveraient aux équations leur caractère linéaire.

Application aux lignes électriques. — Le théorème général de réciprocité s'étend au cas où les réseaux considérés comprennent une ligne télégraphique ou téléphonique, ou, d'une manière générale, une ligne

électrique destinée au transport de l'énergie. Nous avons vu déjà, par l'exemple de la *fig.* 3, qu'il s'applique à une ligne artificielle comprenant un nombre quelconque de condensateurs. Or, une ligne réelle est assimilable à une ligne artificielle dont les sections aa', $a'a''$, $a''a'''$... seraient en nombre infini, c'est-à-dire dont la capacité électrostatique serait répartie d'une manière continue et uniforme.

Considérons une ligne télégraphique composée, par exemple, d'une section aérienne suivie d'une section souterraine. Malgré cette dissymétrie, si une force électromotrice E placée à une extrémité A de la ligne produit à l'autre extrémité B un courant d'intensité $i = \varphi(t)$, la même force électromotrice E placée en B produira en A un courant dont l'intensité variera suivant la même loi : $i = \varphi(t)$. Le résultat serait encore le même si la constitution de la ligne était plus complexe, et notamment si des condensateurs y étaient embrochés aux extrémités, comme cela a lieu en télégraphie sous-marine.

Considérons encore une ligne téléphonique comprenant des sections aériennes, souterraines et sous-marines réparties d'une manière quelconque. Ce sera le cas de la *fig.* 3, en y supposant la ligne artificielle AA'B'B remplacée par une ligne réelle. MNP et M'N'P' sont les circuits primaires contenant les microphones dans les deux postes extrêmes. En vertu du théorème de réciprocité, l'intensité du courant téléphonique que développerait en A'B' une force électromotrice (telle que $E = E_0 \sin mt$) placée en AB est égale à l'intensité du courant que développerait en AB la même force électromotrice placée en A'B'. — En pratique, la force électromotrice de l'un des postes, au lieu d'avoir son

siège en AB (circuit secondaire), prend naissance dans le circuit primaire MNP; la force électromotrice de l'autre poste, au lieu d'être en A'B', est dans le circuit primaire M'N'P'. Quant aux téléphones récepteurs, ils sont dans les branches AB et A'B'. Dans ces conditions, il n'y a pas lieu d'appliquer le théorème de réciprocité, et rien ne prouve que l'intensité du courant produit en A'B' par une force électromotrice placée en MNP soit égale à celle que produit en AB la même force électromotrice placée en M'N'P'.

DÉMONSTRATION DU THÉORÈME DE RÉCIPROCITÉ.

I. *Cas du régime permanent.* — Pour rendre la démonstration plus facile à saisir, nous allons d'abord reprendre le cas classique d'un réseau ne contenant que des forces électromotrices constantes, et où le courant a atteint le régime permanent. Les théorèmes bien connus de Kirchhoff permettent de calculer l'intensité du courant dans chaque branche du réseau.

Prenons d'abord comme cas particulier celui de la *fig.* 1. Une force électromotrice E existe dans la branche MP. Nous désignerons par r, r', r'', ρ, ρ', ρ'' les résistances respectives des branches MP, MQ, QP, NQ, NM, NP, et par i_1, i_2, i_3 les intensités du courant dans les branches PM, MN, NP, le courant étant compté positivement dans le sens indiqué par les flèches. En vertu du premier théorème de Kirchhoff appliqué au sommet M, l'intensité du courant dans la branche MQ est égale à $(i_1 - i_2)$; on peut regarder ce courant comme la superposition de deux courants i_1 et i_2 de sens contraires, ainsi que l'indique la figure. De même les cou-

rants dans les branches QP, NQ ont respectivement pour intensités $(i_1 - i_3)$ et $(i_2 - i_3)$. On voit ainsi que la distribution des courants dans les six branches du réseau est la même que si l'on avait la superposition des trois courants :

i_1 parcourant le circuit fermé PEMQP (circuit 1),
i_2 id. id. QMNQ (circuit 2),
i_3 id. id. QNPQ (circuit 3).

Appliquons à chacun de ces trois circuits fermés le second théorème de Kirchhoff exprimant que la somme des forces électromotrices est égale à la somme des produits des intensités par les résistances des diverses branches. On aura :

$$\left\{\begin{array}{ll} ri_1 + r'(i_1 - i_2) + r''(i_1 - i_3) = E & \text{(circuit 1)} \\ r'(i_2 - i_1) + \rho' i_2 + \rho(i_2 - i_3) = 0 & \text{(circuit 2)} \\ \rho(i_3 - i_2) + \rho'' i_3 + r''(i_3 - i_1) = 0 & \text{(circuit 3)} \end{array}\right.$$

Ces équations peuvent encore s'écrire :

$$\left\{\begin{array}{l} (r + r' + r'')\, i_1 - r' i_2 - r'' i_3 = E \\ -r' i_1 + (r' + \rho' + \rho)\, i_2 - \rho i_3 = 0 \\ -r'' i_1 - \rho i_2 + (\rho + \rho'' + r'')\, i_3 = 0 \end{array}\right.$$

ou bien :

$$(1) \qquad \left\{\begin{array}{l} R_{11} i_1 + R_{12} i_2 + R_{13} i_3 = E \\ R_{12} i_1 + R_{22} i_2 + R_{23} i_3 = 0 \\ R_{13} i_1 + R_{23} i_2 + R_{33} i_3 = 0 \end{array}\right.$$

R_{11}, R_{22}, R_{33} désignant respectivement les résistances totales $(r + r' + r'')$, $(r' + \rho' + \rho)$ et $(\rho + \rho'' + r'')$ des circuits fermés 1, 2 et 3 ; R_{12} désignant la résistance r' de la branche commune aux circuits 1 et 2, affectée du signe — parce que dans cette branche MQ les intensités i_1 et i_2 sont comptées en sens inverse ; enfin R_{13} et R_{23} désignant les quantités analogues $-r''$ et $-\rho$. (Si l'on changeait le sens dans lequel est comptée l'in-

tensité i_2 par exemple, R_{12} et R_{23} représenteraient les valeurs de r' et de ρ prises positivement).

Si la force électromotrice E, au lieu d'être placée dans la branche MP (circuit 1), était dans la branche MN (circuit 2), on obtiendrait les équations :

$$(2) \qquad \left\{ \begin{array}{l} R_{11} i_1 + R_{12} i_2 + R_{13} i_3 = 0 \\ R_{12} i_1 + R_{22} i_2 + R_{23} i_3 = E \\ R_{13} i_1 + R_{23} i_2 + R_{33} i_3 = 0 \end{array} \right.$$

qui ne diffèrent des équations (1) que par la place de E.

L'intensité i_2 du courant développé dans la branche MN par la force électromotrice E placée dans la branche MP est donnée par les équations (1), tandis que l'intensité i_1 du courant développé en MP par la force électromotrice E placée en MN est donnée par les équations (2). Pour démontrer la loi de réciprocité entre les branches MP et MN, il suffit donc de faire voir que la valeur de i_2 tirée de (1) est égale à celle de i_1 tirée de (2). Or des équations (1) on tire, par l'application d'une règle connue :

$$\Delta i_2 = \begin{vmatrix} R_{11} & E & R_{13} \\ R_{12} & 0 & R_{23} \\ R_{13} & 0 & R_{33} \end{vmatrix} = -E \begin{vmatrix} R_{12} & R_{23} \\ R_{13} & R_{33} \end{vmatrix}$$

Δ désignant, par abréviation, le déterminant des coefficients des inconnues :

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} \end{vmatrix}$$

D'autre part, on tire des équations (2) :

$$\Delta i_1 = \begin{vmatrix} 0 & R_{12} & R_{13} \\ E & R_{22} & R_{23} \\ 0 & R_{23} & R_{33} \end{vmatrix} = -E \begin{vmatrix} R_{12} & R_{13} \\ R_{23} & R_{33} \end{vmatrix}$$

L'égalité de ces valeurs de i_2 et de i_1 est évidente, et le théorème est démontré dans ce cas particulier.

L'extension du théorème au cas d'un réseau quelconque est maintenant facile. Les équations (1) et (2) résultent de l'application du second théorème de Kirchhoff aux trois circuits fermés distincts que comporte le réseau de la *fig.* 1, ces trois circuits étant parcourus par des courants i_1, i_2 i_3, qui se superposent dans les branches communes à plusieurs circuits. Dans le cas du réseau de la *fig.* 2, si l'on supprime les condensateurs, on aurait de même à considérer 5 circuits fermés; on pourrait choisir par exemple les circuits MNTSM, NTPN, PQTP, QRSTQ et RMSR. De même, dans un réseau comportants n circuits fermés distincts, on considérera cec n sircuits parcourus respectivement par des courants i_1, i_2 ... i_n, qui se superposent dans les branches communes, et l'on appliquera à chacun d'eux le second théorème de Kirchhoff. Comme on peut constituer ces n circuits d'un certain nombre de manières différentes, on les choisira de telle sorte que la branche A n'appartienne qu'au circuit 1, et que la branche B n'appartienne qu'au circuit 2, A et B désignant les branches auxquelles on veut appliquer le théorème (c'est ce qui a été fait pour les branches MP et MN dans le cas de la *fig.* 1). Alors, suivant que la force électromotrice E est dans la branche A ou dans la branche B, on aura l'un ou l'autre des deux systèmes suivants d'équations, qui ne diffèrent l'un de l'autre que par la place de E :

$$
(1') \quad \left\{ \begin{array}{l}
R_{11} i_1 + R_{12} i_2 + \ldots\ldots + R_{1n} i_n = E \\
R_{12} i_1 + R_{22} i_2 + \ldots\ldots + R_{2n} i_n = 0 \\
\vdots \\
R_{1n} i_1 + R_{2n} i_2 + \ldots\ldots + R_{nn} i_n = 0
\end{array} \right.
$$

$$(2')\quad \begin{cases} R_{11} i_1 + R_{12} i_2 + \ldots\ldots + R_{1n} i_n = 0 \\ R_{12} i_1 + R_{22} i_2 + \ldots\ldots + R_{2n} i_n = E \\ \vdots \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \vdots \\ R_{1n} i_1 + R_{2n} i_2 + \ldots\ldots + R_{nn} i_n = 0 \end{cases}$$

R_{11}, R_{22}, ... R_{nn} désignent les résistances totales des circuits 1, 2 ... n respectivement; R_{kl} la résistance de la branche commune aux circuits k et l, prise positivement ou négativement suivant que les courants i_k et i_l sont comptés dans le même sens ou en sens contraire sur la branche commune.

Si l'on tire des équations (1') la valeur de i_2 et des équations (2') celle de i_1, on trouve :

$$\Delta i_2 = \Delta_{12} E$$
$$\Delta i_1 = \Delta_{21} E$$

Δ désignant le déterminant des coefficients des inconnues :

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \ldots\ldots & R_{1n} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & \ldots\ldots & R_{2n} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & \ldots\ldots & R_{3n} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ R_{1n} & R_{2n} & R_{3n} & \ldots\ldots & R_{nn} \end{vmatrix}$$

Δ_{12} désignant le mineur obtenu en supprimant dans Δ la première ligne et la deuxième colonne; Δ_{21} le mineur obtenu en supprimant dans Δ la deuxième ligne et la première colonne. En raison de la symétrie du déterminant Δ, ces deux mineurs sont égaux. Il en résulte que les valeurs ci-dessus de i_2 et de i_1 sont égales et, par suite, que la loi de réciprocité est démontrée pour un réseau quelconque dans le cas du régime permanent.

II. *Cas du régime variable.* — Dans le cas général du régime variable, le calcul de l'intensité du courant dans

les diverses branches du réseau se fait, comme dans le cas du régime constant, par l'application du second théorème de Kirchhoff, mais à la condition de tenir compte, dans chacun des n circuits fermés, des forces électromotrices d'induction. Ainsi le circuit 1 sera le siège d'une force électromotrice $-M_{11}\frac{di_1}{dt}$, induite par la variation du courant i_1 lui-même, et de forces électromotrices $-M_{12}\frac{di_2}{dt}$, $-M_{13}\frac{di_3}{dt}$, ... $-M_{1n}\frac{di_n}{dt}$ induites par les variations des courants i_2, i_3, ... i_n; M_{11} désignant le coefficient de self-induction du circuit 1 et M_{1k} le coefficient d'induction mutuelle des circuits 1 et k. La première des équations (1') devra donc être modifiée ainsi :

$$R_{11}i_1 + R_{12}i_2 + \ldots\ldots + R_{1n}i_n = E - M_{11}\frac{di_1}{dt} - M_{12}\frac{di_2}{dt} - \ldots\ldots - M_{1n}\frac{di_n}{dt}$$

ou :

$$\left(R_{11}i_1 + M_{11}\frac{di_1}{dt}\right) + \left(R_{12}i_2 + M_{12}\frac{di_2}{dt}\right) + \ldots + \left(R_{1n}i_n + M_{1n}\frac{di_n}{dt}\right) = E.$$

Pour abréger, nous écrirons cette équation :

$$\rho_{11}i_1 + \rho_{12}i_2 + \ldots\ldots + \rho_{1n}i_n = E,$$

en employant la notation symbolique :

$$(3)\quad \rho_{11} = R_{11} + M_{11}\frac{d}{dt} \quad \rho_{12} = R_{12} + M_{12}\frac{d}{dt} \ldots\ldots \rho_{1n} = R_{1n} + M_{1n}\frac{d}{dt}.$$

Les équations suivantes du système (1') seront modifiées d'une manière analogue, de telle sorte que ce système deviendra :

$$(4)\quad \left\{\begin{array}{l} \rho_{11}i_1 + \rho_{12}i_2 + \ldots\ldots + \rho_{1n}i_n = E \\ \rho_{12}i_1 + \rho_{22}i_2 + \ldots\ldots + \rho_{2n}i_n = 0 \\ \vdots \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\quad \vdots \\ \rho_{1n}i_1 + \rho_{2n}i_2 + \ldots\ldots + \rho_{nn}i_n = 0 \end{array}\right.$$

De même le système (2′), correspondant au cas où la force électromotrice E est située dans la branche B (circuit 2), deviendra :

$$(5)\quad \left\{\begin{array}{l} \rho_{11} i_1 + \rho_{12} i_2 + \ldots\ldots + \rho_{1n} i_n = 0 \\ \rho_{12} i_1 + \rho_{22} i_2 + \ldots\ldots + \rho_{2n} i_n = E \\ \vdots \\ \rho_{1n} i_1 + \rho_{2n} i_2 + \ldots\ldots + \rho_{nn} i_n = 0 \end{array}\right.$$

(4) et (5) sont des systèmes d'équations différentielles linéaires à coefficients constants et à seconds membres, que l'on sait intégrer. Pour déterminer les intensités i_1, i_2 ... i_n en fonction du temps t, il faut ajouter à ces équations les conditions initiales du problème. Ces conditions seront qu'à l'époque $t = o$, où l'on introduit la force électromotrice E, l'intensité initiale du courant dans les diverses branches est nulle :

$$(6)\qquad \text{pour } t = 0, \quad i_1 = i_2 \ldots\ldots = i_n = 0.$$

Pour démontrer la loi de réciprocité entre les branches A et B, il suffit de constater que l'expression de i_2 tirés du système (4) est identique à celle de i_1 tirée du système (5). Or, il est facile de vérifier que les équations (4) et (6) sont identiquement satisfaites par la solution :

$$(7)\qquad i_1 = \Delta_{11} u \quad i_2 = \Delta_{12} u \ldots\ldots i_n = \Delta_{1n} u,$$

et que les équations (5) et (6) le sont par ;

$$(8)\qquad i_1 = \Delta_{21} u \quad i_2 = \Delta_{22} u \ldots\ldots i_n = \Delta_{2n} u.$$

u désignant une fonction définie par l'équation différentielle d'ordre n :

$$\Delta u = E,$$

et par les n conditions initiales :

$$(9) \qquad u = \frac{du}{dt} = \ldots\ldots = \frac{d^{n-1}u}{dt^{n-1}} = 0 \quad \text{pour } t = 0.$$

Dans ces formules Δ représente le déterminant symbolique :

$$\Delta = \begin{vmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \ldots\ldots & \rho_{1n} \\ \rho_{12} & \rho_{22} & \ldots\ldots & \rho_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \rho_{1n} & \rho_{2n} & \ldots\ldots & \rho_{nn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{11} + M_{11}\frac{d}{dt} & \ldots\ldots & R_{1n} + M_{1n}\frac{d}{dt} \\ \vdots & & \vdots \\ R_{1n} + M_{1n}\frac{d}{dt} & \ldots\ldots & R_{nn} + M_{nn}\frac{d}{dt} \end{vmatrix}$$

et Δ_{hk} le mineur obtenu en supprimant dans ce déterminant la ligne de rang h et la colonne de rang k. En particulier les mineurs Δ_{12} et Δ_{21} sont identiques à cause de la symétrie du déterminant Δ. Il en résulte que l'expression $i_2 = \Delta_{12}u$ tirée du système (4) est identique à l'expression $i_1 = \Delta_{21}\,u$ tirée du système (5) ; ce qui démontre le théorème.

Nous n'avons considéré, il est vrai, que le cas d'un réseau unique. Si l'on a un ensemble de réseaux non reliés entre eux métalliquement, on aura encore à appliquer le second théorème de Kirchhoff ($\Sigma\,E = \Sigma\,Ri$) à n' circuits fermés pris dans le premier de ces réseaux, à n'' circuits fermés pris dans le second, etc. Et, si nous désignons par n le nombre total $(n' + n'' + \ldots)$ des circuits ainsi considérés, on obtiendra ainsi un système de n équations, qui ne différera pas du système (4) ou du système (5), suivant que la force électromotrice E est placée dans la branche A ou dans la branche B. Il n'est point nécessaire, du reste, que ces branches A et B appartiennent à un même réseau. Le théorème s'étend donc bien au cas d'un ensemble quelconque de réseaux.

Enfin nous avons annoncé que le théorème subsiste lorsque les branches du réseau sont coupées en partie ou en totalité par des condensateurs. Pour le montrer, on remarquera que le deuxième théorème de Kirchhoff peut encore s'appliquer aux n circuits fermés que nous avons considérés jusqu'à présent, à la condition que l'on comprenne, au nombre des forces électromotrices contenues dans un circuit, un terme exprimant les chutes brusques de potentiel entre les deux armatures de chacun des condensateurs que l'on rencontre sur le parcours de ce circuit. Or la chute de potentiel entre les armatures d'un condensateur de capacité C, qui a une charge $\int idt$, est égale à $\frac{1}{c}\int idt$. Ainsi, pour le circuit 1, le terme à ajouter est :

$$-\frac{1}{C_{11}}\int_0^t i_1 dt - \frac{1}{C_{12}}\int_0^t i_2 dt - \ldots\ldots - \frac{1}{C_{1n}}\int_0^t i_n dt,$$

C_{11} désignant la capacité résultante de l'ensemble des condensateurs embrochés sur le circuit 1, C_{1k} celle des condensateurs embrochés sur la branche commune aux circuits 1 et k (s'il n'y a pas de condensateurs sur cette branche, on n'a qu'à faire $\frac{1}{C_{1k}} = o$). On aura donc, par l'application du théorème de Kirchhoff au circuit 1 :

$$R_{11} i_1 + M_{11}\frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_{11}}\int_0^t i_1 dt + R_{12} i_2 + \ldots\ldots = E;$$

ou plus simplement :

$$\rho_{11} q_1 + \rho_{12} q_2 + \ldots\ldots + \rho_{1n} q_n = E,$$

en désignant par q_k la quantité d'électricité $\int_0^t i_k dt$ et en

posant symboliquement :

$$\rho_{hk} = \frac{1}{C_{hk}} + R_{hk}\frac{d}{dt} + M_{hk}\frac{d^2}{dt^2}.$$

On aura une équation semblable pour chacun des n circuits fermés. L'ensemble des équations ainsi obtenues sera donc :

$$(10)\quad \begin{cases} \rho_{11}q_1 + \rho_{12}q_2 + \ldots\ldots + \rho_{1n}q_n = E \\ \rho_{12}q_1 + \rho_{22}q_2 + \ldots\ldots + \rho_{2n}q_n = 0 \\ \vdots \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \vdots \\ \rho_{1n}q_1 + \rho_{2n}q_2 + \ldots\ldots + \rho_{nn}q_n = 0 \end{cases}$$

en supposant la force électromotrice E placée dans la branche A. Si la force électromotrice E est au contraire placée dans la branche B, on aura :

$$(11)\quad \begin{cases} \rho_{11}q_1 + \rho_{12}q_2 + \ldots\ldots + \rho_{1n}q_n = 0 \\ \rho_{12}q_1 + \rho_{22}\rho_2 + \ldots\ldots + \rho_{2n}q_n = E \\ \vdots \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \vdots \\ \rho_{1n}q_1 + \rho_{2n}q_2 + \ldots\ldots + \rho_{nn}q_n = 0 \end{cases}$$

A ces équations différentielles on devra ajouter les $2n$ conditions initiales :

$$(12)\quad q_1 = q_2 = \ldots\ldots = q_n = \frac{dq_1}{dt} = \ldots\ldots = \frac{dq_n}{dt} = 0 \text{ pour } t = 0,$$

car, à l'origine du temps, non seulement les intensités $i_k = \frac{dq_k}{dt}$ sont nulles, mais les quantités d'électricité $q_k = \int_0^t i_k\,dt$ sont nulles elles-mêmes.

Il est facile de vérifier que les équations (10) et (12) admettent la solution :

$$(13)\qquad q_1 = \Delta_{11}u \quad q_2 = \Delta_{12}u \ldots\ldots q_n = \Delta_{1n}u,$$

et que les équations (11) et (12) admettent la solution :

$$(14) \qquad q_1 = \Delta_{21} u \quad q_2 = \Delta_{22} u \; \ldots\ldots \; q_n = \Delta_{2n} u,$$

u désignant une fonction qui satisfait à l'équation différentielle d'ordre $2n$:

$$\Delta u = \mathrm{E},$$

et aux $2n$ conditions initiales :

$$u = \frac{du}{dt} = \ldots\ldots = \frac{d^{2n-1}u}{dt^{2n-1}} = 0 \quad \text{pour } t = 0.$$

Le déterminant Δ des coefficients ρ_{11}, ρ_{12} ... ρ_{nn} des équations (10) et (11) n'est pas le même que celui des équations (4) et (5), puisque les coefficients ρ n'ont plus la même signification. Mais ce déterminant est encore symétrique et les mineurs Δ_{12} et Δ_{21} sont encore identiques. Il en résulte que l'expression de q_2 (ou de $i_2 = \frac{dq_2}{dt}$) tirée des équations (10) est identique à celle de q_1 $\left(\text{ou de } i_1 = \frac{dq_1}{dt}\right)$ tirée des équations (11). La généralité de la loi de réciprocité est par là même démontrée.

APPLICATION AUX BRANCHES CONJUGUÉES.

Si les branches A et B, appartenant à un réseau ou à un ensemble de réseaux défini comme ci-dessus, sont telles qu'une force électromotrice quelconque, constante ou variable, placée en A, ne produise en B aucun courant, réciproquement une force électromotrice quelconque placée en B ne produira aucun courant en A ; c'est là un cas particulier du théorème de réciprocité. On dit alors que les branches A et B sont *conjuguées*. Cherchons dans quelles conditions il en est ainsi.

Si l'on se reporte à celle des formules 7 (ou 13) qui donne l'expression $\Delta_{12}\,u$ du courant i_2 (ou de la quantité d'électricité q_2) développé dans la branche B par la force électromotrice E placée en A, on voit que la condition nécessaire et suffisante pour que les branches A et B soient conjuguées est que Δ_{12} soit identiquement nul. Or on a :

$$\Delta_{12} = \begin{vmatrix} \rho_{12} & \rho_{23} & \rho_{24} & \cdots\cdots & \rho_{2n} \\ \rho_{13} & \rho_{33} & \rho_{34} & \cdots\cdots & \rho_{3n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \rho_{1n} & \rho_{3n} & \rho_{4n} & \cdots\cdots & \rho_{nn} \end{vmatrix}$$

Dans le cas le plus simple où le réseau ne renferme pas de condensateurs, d'après la forme symbolique des éléments de ce déterminant (formules 3), on trouvera, tous calculs faits, que Δ_{12} est de la forme :

$$\Delta_{12} = A_0 + A_1 \frac{d}{dt} + A_2 \frac{d^2}{dt^2} + \ldots\ldots + A_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}},$$

A_0, A_1 .... A_{n-1} désignant n coefficients constants, qui dépendent des résistances et des coefficients d'induction des diverses branches du réseau ou de l'ensemble des réseaux. Pour que Δ_{12} soit identiquement nul, il faut que l'on ait les n conditions :

$$A_0 = A_1 = \ldots\ldots = A_{n-1} = 0.$$

Considérons, par exemple, le cas où $n = 3$ (cas du pont de Wheatstone). On a alors :

$$\Delta_{12} = \begin{vmatrix} \rho_{12} & \rho_{23} \\ \rho_{13} & \rho_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{12} + M_{12}\frac{d}{dt} & R_{23} + M_{23}\frac{d}{dt} \\ R_{13} + M_{13}\frac{d}{dt} & R_{33} + M_{33}\frac{d}{dt} \end{vmatrix}$$

$$= R_{12}R_{33} - R_{13}R_{23} + [R_{12}M_{33} + R_{33}M_{12} - R_{13}M_{23} - R_{23}M_{13}]\frac{d}{dt}$$
$$+ (M_{12}M_{33} - M_{13}M_{23})\frac{d^2}{dt^2}.$$

Les conditions nécessaires et suffisantes pour que les branches A et B soient conjuguées sont donc les trois suivantes :

$$(15)\quad \left\{ \begin{array}{l} R_{12}R_{33} - R_{13}R_{23} = 0, \\ R_{12}M_{33} + R_{33}M_{12} - R_{13}M_{23} - R_{23}M_{13} = 0, \\ M_{12}M_{33} - M_{13}M_{23} = 0. \end{array} \right.$$

La première de ces trois conditions est celle que l'on trouve dans le cas ordinaire du *régime permanent.* Il est facile de constater qu'elle ne peut être vérifiée que pour deux branches A et B non adjacentes. — Lorsqu'on mesure une résistance par la méthode du pont de Wheatstone en employant un téléphone et une force électromotrice variable, les conditions (15) doivent être remplies simultanément pour que le silence soit parfait dans le téléphone.

VASCHY.

NOTE

SUR LA CONSTRUCTION ET LA POSE

DU CABLE MARSEILLE-ORAN

Le câble sous-marin de Marseille à Oran dont la fourniture et la pose avaient été adjugées le 27 août 1891 à la Société générale des téléphones, a été immergé à la fin du mois d'août dernier, et mis à la disposition du public le 7 septembre suivant, avec une avance de plus de deux mois sur le délai qui était accordé à la Société concessionnaire.

La longueur immergée de ce câble est de 592,6 milles marins et dépasse de 1/5 environ la longueur des câbles qui relient Marseille à Alger. Une maison française ayant exécuté pour la première fois un travail de cette importance pour le compte du gouvernement, les lecteurs des *Annales* accueilleront sans doute avec intérêt quelques renseignements sur la construction et la pose de ce câble.

Les âmes ont été fabriquées à l'usine de Bezons, près Paris, par pièces de 1 1/2 à 2 milles marins de longueur qui étaient soumises aux essais de réceptions. Le cahier des charges du 26 juin 1891, applicable à l'entreprise, dérogeant sur ce point aux clauses correspondantes des cahier des charges antérieurs, stipulait que les essais des âmes seraient faits, au plus tôt sept jours après leur fabrication et qu'après vingt-

quatre heures d'immersion dans de l'eau à 24° C, le diélectrique devrait avoir un isolement compris entre 300 et 1.500 megohms par mille marin, après deux minutes de charge soit avec le courant positif, soit avec le courant négatif. La pile employée aux essais d'isolement ne devait pas avoir une force électromotrice inférieure à celle de 200 éléments Daniell. Aucune section n'eut un isolement inférieur à 700 Ω par mille et, bien que l'on ait trouvé tous les isolements intermédiaires entre 700 et 1.500 Ω, on peut classer les âmes reçues en deux catégories, les unes à isolements faibles compris entre 700 et 900 Ω, les autres à isolements élevés compris entre 1.400 et 1.500 Ω. Ces deux catégories correspondaient manifestement à deux qualités de gutta-percha fort différentes : on verra plus loin l'influence qu'elles ont eue sur le câble entier.

Les essais des âmes sur bobines se font dans des cuves remplies d'eau dont la température est élevée et maintenue à 24° C à l'aide d'un courant de vapeur convenablement réglé. Pour les essais de réception du câble même, ce procédé n'est plus applicable ; les cahiers des charges précédents admettaient que l'on fît usage des tables de correction de MM. Clark et Sabine. Mais ces tables ayant été établies il y a une trentaine d'années, à une époque où la qualité des guttas-perchas était absolument différente de celle des guttas que le commerce livre aujourd'hui à l'industrie des câbles sous-marins, le cahier des charges du 26 juin 1891 avait spécifié que les corrections relatives aux différences de température du diélectrique seraient effectuées à l'aide d'une table dressée pendant la fabrication même du câble.

Nous reproduisons ci-après la table qui a été éla-

borée dans ce but à Bezons par MM. Lagarde et Jacquin, représentants de l'administration des Postes et Télégraphes, et MM. Vlasto et Bresse, représentants de la Société générale des téléphones :

TABLE

Résistances relatives après 2 minutes d'électrification de la gutta-percha employée pour les âmes du câble de Marseille à Oran.

TEMPÉRATURES en degrés centigrades	RÉSISTANCES relatives	TEMPÉRATURES en degrés centigrades	RÉSISTANCES relatives
7	11,425	20	1,658
8	10,088	21	1,459
9	8,690	22	1,285
10	7,474	23	1,137
11	6,422	24	1
12	5,544	25	0,900
13	4,764	26	0,809
14	4,098	27	0,723
15	3,514	28	0,647
16	3,030	29	0,600
17	2,572	30	0,521
18	2,215	31	0,468
19	1,935	32	0,420

Si l'on admet que la loi de variation de la résistance de la gutta-percha avec la température est représentée par une relation de la forme

$$\frac{R}{R_1} = A^{t-t_1},$$

dans laquelle R et R_1 représentent les résistances aux températures correspondantes t et t_1 et A une constante, la valeur moyenne de A que l'on tire des nombres ci-dessus, en ne considérant que les températures comprises entre $+ 7°$ et $+ 24°$ C, est de 0,87301. Elle ne s'écarte pas très notablement de celle de 0,87604 qui est généralement admise; mais il convient de remarquer que les valeurs extrêmes de A, pour des différences de températures de 1° à 17°, résultant de

la table ci-dessus, varient de 0,86652 à 0,87950. Les âmes employées à ces essais ayant été fabriquées récemment et la résistance d'isolement de la gutta-percha augmentant, comme on sait, pendant les premiers temps qui suivent sa fabrication, on peut craindre que ces variations n'aient exercé une influence fâcheuse sur les résultats obtenus. D'un autre côté, ces âmes, au nombre de six, avaient des isolements compris entre 1.200 et 1.500 Ω par mille marin et avaient conséquemment été fabriquées avec la gutta à isolement élevé : les données de la table ne peuvent dès lors être appliquées avec rigueur au câble entier. Malgré ces réserves, il est regrettable que les expériences n'aient pas été étendues aux températures inférieures à + 7° qui ont été atteintes au cours de la fabrication.

Après la reprise par l'État, à la fin de 1889, des réseaux téléphoniques, la Société générale des Téléphones, pour utiliser ses capitaux devenus disponibles, avait résolu de porter son activité sur l'industrie des câbles sous-marins. En moins d'un an, elle installa à Calais, à côté de l'un des nombreux bassins qui venaient d'y être creusés, une magnifique usine parfaitement outillée et aménagée pour le revêtement de l'âme des câbles sous-marins. C'est dans cette usine qu'avaient été terminés la majeure partie des câbles qui constituent aux Antilles le réseau de la Société française des câbles sous-marins ; c'est là également que les âmes du câble de Marseille à Oran reçurent les enveloppes extérieures destinées à compléter le câble. Ces enveloppes consistaient en : 1° deux couches enroulées en sens inverse, de jute tanné ; 2° l'armature des fils de fer, variable pour les trois types de câble, mer profonde, intermédiaire et côtier, suivant la spécification

portée au cahier des charges ; 3° une composition bitumineuse et siliceuse, avec deux couches enroulées en sens inverse de filins de chanvre. Les machines de l'usine de Calais n'étant pas disposées pour recouvrir l'armature de fer de bandes de toile, la Société avait, usant de la latitude que lui laissait à cet égard le cahier des charges, substitué ces filins aux bandes de toile qui sont plus généralement employées. Les modifications nécessaires ont dû être apportées depuis lors à ces machines pour que l'un ou l'autre des deux systèmes de recouvrement extérieur puisse être mis en œuvre à volonté.

Deux ingénieurs de l'administration, MM. Pomey et Brylinski, suivirent, à Calais, depuis le 3 mars 1892, date à laquelle commencèrent les travaux dans cette usine, jusqu'au 9 juin, date à laquelle ils furent terminés, tous les détails de la fabrication et tous les essais électriques destinés soit à constater le bon état des âmes reçues de Bezons, soit à vérifier les soudures des diverses longueurs d'âmes entre elles et enfin à découvrir les défauts qui pourraient se produire au cours de la fabrication. Toutes les sections étaient soigneusement numérotées, les joints repérés et les opérations et résultats des essais électriques inscrits sur des registres dont nous donnons les types ci-après. Des marques en gutta-percha, frappées à l'emporte-pièce d'un numéro d'ordre, étaient en outre attachées au câble de mille en mille pour faciliter le contrôle et les recherches.

Les essais de réception du câble fabriqué ont été effectués à l'usine de Calais le 9 juin 1892 et ont donné les résultats suivants :

Longueur totale en essai.

Câble de côte	13,0097	milles marins
Id. intermédiaire.	17,0319	—
Id. de grand fonds	600,8894	—
Total.	630,9310	milles marins

Résistance du cuivre.

Moyenne de 8 lectures par courant alternés		6737ω,6
Résistance calculée d'après les résistances des âmes à 24° C.	totale.	7054 ,9
	par mille.	11 ,181

Température moyenne des âmes au moment des essais :

Observée	12° 4
Déduite de la mesure de la résistance du cuivre.	11 2

Conductibilité du cuivre rapportée à celle du cuivre pur, 98 p. 100.

Isolement.

(200 éléments Leclanché.)

		Total.	Par mille
Isolement à 24° C., au bout de la deuxième minute d'électrification	courant —	2Ω,145	1343Ω
	courant +	2 ,15	1357
Isolement calculé d'après celui des âmes.			1215
Augmentation depuis la fabrication (4 mois en moyenne).			11,4 p. 100

Capacité électrostatique.

Méthode de sir W. Thomson.
18 éléments Leclanché;
Capacité du condensateur de comparaison 20ᶠ;
Durée de la charge 15″;
Durée de la décharge du câble sur le condensateur 15″.

	Branches de proportion.	Capacité.	Moyenne.	Fils de secours.	Capacité du câble.
Courant —	9030ω/970	186,19	192ᶠ,87	0ᶠ,09	192ᶠ,78
Id. +	9089 /911	199,54			

Capacité par mille, 0ᶠ,306.

Le câble fut embarqué sur le *François-Arago*, bâtiment à vapeur de 1.800 tonneaux que la Société générale des Téléphones venait d'acheter en Angleterre et qui avait été utilisé déjà pour l'immersion d'une grande partie des câbles du réseau des Antilles. L'opération, retardée jusqu'au 1er août par suite de diverses modi-

fications qui furent apportées à l'aménagement du bateau et notamment de l'installation de la lumière électrique à bord, fut terminée le 10 août ; trois jours après le *François-Arago* partait pour Oran.

Les points choisis pour l'atterrissement du nouveau câble étaient : sur la côte d'Afrique, la plage située au pied de la batterie déclassée des Ozaras, au milieu de la baie de Mers-el-Kébir, qui permettait d'atterrir par des fonds de sable, tout en se tenant en dehors de la zone des mouillages ; sur la côte de France, la rade d'Endoume où atterrissent déjà de nombreux câbles français et étrangers. En raison toutefois des nombreux inconvénients que présente la rivière l'Huveaune, inconvénients qui avaient fait abandonner déjà ce cours d'eau comme point d'atterrissage par les Compagnies anglaises, un nouvel emplacement, situé à 4 ou 500 mètres au nord de l'embouchure de l'Huveaune et contigu à l'établissement des bains de mer du Roucas-Blanc, avait été reconnu et arrêté de concert avec les autres services intéressés, pour l'atterrissage des câbles français. Une maison spacieuse avait été construite sur la plage pour y effectuer la jonction des lignes sous-marines avec la ligne souterraine qui devait leur faire suite jusqu'à l'hôtel des postes et télégraphes à Marseille, et permettre de faire commodément la série des essais qui doivent se poursuivre jour et nuit, sans interruption, pendant la pose ou la réparation des câbles. Le mauvais état de la ligne souterraine aboutissant à l'ancienne maison d'atterrissement du parc Borelly n'ayant plus permis à l'administration d'en tirer aucun parti, une nouvelle ligne en tuyaux de fonte de $0^{m},081$, posés à 1 mètre de profondeur, fut établie entre la maison du Roucas-Blanc

et le bureau de poste et de télégraphe de la place de la préfecture à Marseille, où l'on trouvait des conducteurs disponibles en quantité suffisante (5.000 mètres de longueur). Dix câbles à un conducteur, recouverts chacun d'une enveloppe de plomb, furent tirés à travers la conduite de fonte; cinq d'entre eux étaient destinés à être mis en service immédiatement et les cinq autres à constituer une réserve. Des expériences spécialement faites à cet effet par M. l'ingénieur Couzy, à Alger, avaient démontré le trouble que l'envoi de signaux sur l'un des câbles de Marseille à Alger apporte au travail des deux autres câbles, lorsque les conducteurs de la ligne souterraine de Hussein-Dey à Alger sont pris dans un même câble à plusieurs conducteurs, à moins que l'on n'emploie comme récepteurs des miroirs suspendus à plusieurs fils de ramie ou à une cordelette de fils de cocon. C'est pour parer à cet inconvénient que tous les fils de la ligne souterraine du Roucas-Blanc restèrent distincts les uns des autres.

Le Génie militaire ayant, d'un autre côté, mis gracieusement à la disposition de l'administration, dans le réduit de la batterie des Ozaras, les pièces nécessaires à l'installation d'une salle d'expériences, on put faire l'économie de la construction d'une maison spéciale aux environs d'Oran. Une ligne souterraine, constituée par un câble armé à trois conducteurs, fut établie entre la batterie et la recette principale des postes et télégraphes d'Oran (longueur 5.500 mètres); pour éviter, dans la mesure du possible, l'effet de la chaleur sur la gutta-percha de ce câble, la profondeur de la tranchée fut portée à $1^{m},25$ et le câble enfermé dans un caniveau formé de tuiles demi-rondes placées

sur des briques plates non jointoyées. Les briques plates reposaient sur une couche de sable de mer fin, de $0^{m},05$ d'épaisseur; après l'introduction du câble dans la conduite, celle-ci fut recouverte d'une seconde couche de $0^{m},20$ d'épaisseur de ce même sable. Ce travail qui a dû être exécuté sur une route très étroite, dans la saison la plus chaude de l'année et lorsque la circulation y est des plus actives, dans un terrain très dur où le quartz et le porphyre viennent parfois affleurer à la surface, a été suivi et dirigé par M. l'ingénieur Rheins.

Le 24 août, le *François-Arago*, après avoir exploré les fonds du golfe d'Oran jusqu'à la hauteur du cap de l'Aiguille, porta à terre l'extrémité du câble d'atterrissement ; une tranchée de 124 mètres de longueur et de $1^{m},50$ de profondeur avait été ouverte préalablement entre le bord de la mer et le réduit de la batterie des Ozaras. Le câble fut placé au fond de cette tranchée et enfermé dans une conduite en poterie semblable à celle qui contenait le câble souterrain ; à la traversée de la route nationale, la conduite en poterie fut remplacée par des fourreaux à coquille en fonte et la tranchée approfondie à 2 mètres, de façon à éviter toute détérioration possible du câble par des services étrangers qui viendraient à ouvrir des fouilles en ce point.

$7^{milles},994$ de câble de côte et $4^{milles},483$ de câble intermédiaire furent immergés ensuite et l'extrémité obturée et reliée à une bouée. L'épissure de ces deux câbles était tombée à la limite des fonds de 100 mètres ; la bouée flottait sur les fonds de 500 mètres.

Le *François-Arago* se dirigea de là vers Marseille en effectuant une série de sondages le long de la route qu'il devait suivre en immergeant le câble de grands

fonds. En partant du cap de l'Aiguille dans la direction du N. N.-E, on trouva que les fonds s'abaissaient très rapidement ; à 5 ou 6 milles de la côte, on atteignit les fonds de 14 à 1.500 brasses qui se maintiennent sans variation sensible dans toute la traversée du grand chenal qui longe la côte nord de l'Algérie et aboutit au détroit de Gibraltar. Le terrain est constitué par une vase jaunâtre , formée de coquilles brisées, qui est très favorable à la conservation des câbles. Les fonds remontent ensuite en pente douce jusqu'à la hauteur du cap San-Antonio où l'on trouve un minimum de 334 brasses. Une nouvelle dépression atteignant 1.273 brasses se produit dans la direction du canal qui sépare les îles de Majorque et de Minorque et la vase prend une couleur grisâtre, devient assez compacte et est moins favorable pour les dragages. Les fonds se relèvent ensuite assez doucement sans changer sensiblement de nature; toutefois, à 8 ou 10 milles au sud de Planier, on a rencontré un terrain dur que l'on a dû éviter lors de la pose du câble.

La machine à sonder, du type bien connu de lord Kelvin (sir W. Thomson), était installée à l'avant du navire ; le fil métallique, avant de se rendre à la mer, passait sur une sorte de balance de Salter, comprenant un très long bras de levier dont les oscillations étaient amorties par 6 forts tirants en caoutchouc. Aussi les sondages, au nombre de 55, furent-ils effectués sans donner lieu à une seule rupture de fil. Dans les grandes profondeurs, on sondait à plomb perdu à l'aide d'appareils du système Brooks ; une petite machine Brotherhood permettait de ramener le fil et le tube contenant l'échantillon du fond à la vitesse de 80 brasses par minute environ.

Le 30 août, l'extrémité du câble de côte était portée à la maison d'atterrissement du Roucas-Blanc et le *François-Arago* se dirigeait vers la bouée mouillée à l'entrée du golfe d'Oran en immergeant successivement.

milles		
4,966 de câble de côte;		
11,990	id.	intermédiaire;
563,177	id.	grands fonds.

La jonction avec le câble intermédiaire d'Oran était terminée le 3 septembre dans la soirée, sans qu'aucun incident serieux se fût produit pendant les quatre jours que dura l'immersion. Le chemin parcouru par le navire pendant la pose du câble de grands fonds ayant été de 519^{milles},5, le mou moyen avait été de 8,4 p. 100. Il avait varié entre 3 et 12,5 p. 100 et ne s'était élevé à 20 p. 100 qu'à la montée rapide des fonds, aux approches de la côte d'Afrique. La vitesse de marche du bâtiment avait varié de 6 à 7 nœuds; l'angle d'immersion du câble était de 8°,50 dans les grands fonds.

Les communications électriques établies à bord pour vérifier, au cours de la pose, l'état du câble, étaient celles nécessaires pour mesurer l'isolement; la pile employée comprenait 100 éléments Leclanché épaissis à l'agar-agar. Les déviations lues au galvanomètre étaient notées de minute en minute. De 5 en 5 minutes, l'extrémité du câble était mise, à la guérite, en communication pendant un instant avec un condensateur; il en résultait, à bord, sur l'aiguille du galvanomètre, une impulsion qui prouvait la continuité du conducteur. Tous les quarts d'heure le sens du courant était renversé à bord. Toutes les quatre heures on mesurait la constante du galvanomètre, l'isolement du câble que

les agents restés à la guérite du Roucas-Blanc détachaient des appareils et la résistance du cuivre.

Les essais de réception du câble, effectués à la guérite des Ozaras, dans la nuit du 4 au 5 septembre, donnèrent les résultats suivants :

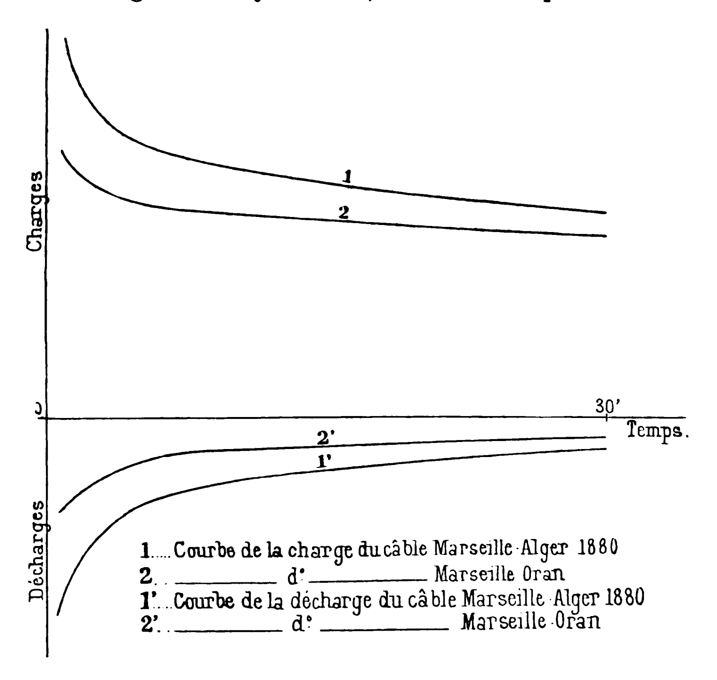
Longueur du conducteur.			592^{milles},610
Résistance du cuivre.	totale.		6363^{ω}
	par mille marin.		10 ,74
Isolement après 2 minutes d'électrification avec 75 éléments Leclanché.	total	par courant négatif . .	19^{Ω},37
		id. positif . .	20 ,66
	par mille marin en moyenne .		11860

La résistance du cuivre, mesurée au cours de la fabrication, étant de 11^{ω} 181 par mille à 24° C, le conducteur se trouvait au moment des essais à la température de 11°,4. La température des eaux de la Méditerranée, dans les profondeurs supérieures à 100 brasses, étant uniformément de 12°,8, d'après de nombreuses observations, on doit en conclure que le conducteur en cuivre n'avait pu arriver encore à se mettre en équilibre de température avec les eaux avoisinantes. Les nombres que fourniront les essais de réception définitive du câble permettront d'éclaircir ce point.

Si l'on construit les courbes de l'électrification et de la décharge du câble à l'aide des observations qui avaient été faites de 15″ en 15″ pendant 30′ pour chaque courant et si on les compare aux courbes analogues fournies par le câble posé entre Marseille et Alger en 1880, on remarque que les courbes relatives au câble d'Oran sont moins creusées vers l'origine des coordonnées et au bout des 5 ou 6 premières minutes se rapprochent davantage d'une droite faiblement inclinée sur l'axe des temps.

Cette différence, que nous ne pouvons attribuer qu'à la qaulité particulière des guttas mises en œuvre

aujourd'hui, aurait pour effet, s'il s'agissait de très longs câbles, de ralentir la décharge de la ligne et par suite de diminuer sa capacité de transmission et son rendement industriel. D'un autre côté, les irrégularités, quelque faibles qu'elles soient, que l'on a observées dans l'électrification du câble, doivent, à notre avis, être attribuées au défaut d'homogénéité des guttas employées : les limites de 300 à 1.500 meghoms admises par le cahier des charges du 26 juin 1891, sont donc trop étendues.



L'exploitation du câble Marseille-Oran devait se faire d'après le système en usage sur les câbles de Marseille à Alger, à l'aide de recorders à aimants permanents et siphons à larges sections, avec mouvements d'horlogerie distincts pour le déroulement du papier,

condensateurs intercalés sur la ligne et transmission automatique ou à la main, à volonté. De très beaux signaux furent rapidement obtenus avec une pile de 7 éléments Callaud grand modèle et des condensateurs ayant 35 microfarads de capacité, à chaque extrémité de la ligne. A Oran, on avait pris comme fil de terre l'armature du câble souterrain dont la continuité avait été établie à l'aide de cordelettes en cuivre soudées à deux des fils de fer de chaque section de câble entrant dans les chambres de soudures de la ligne et dont la dernière avait été soudée, aux Ozaras, sur l'armature du câble sous-marin. A Marseille, on avait soudé l'armature du câble de côte sur la conduite en fonte de la ligne souterraine : mais des dérivations, dues au mauvais état de la ligne souterraine du parc Borelly qui suivait un tracé voisin de la nouvelle ligne, s'étant produites entre les câbles de cette ligne et la conduite en fonte, on dut, pour les éviter, employer provisoirement comme fil de terre deux conducteurs isolés sans emploi de la nouvelle ligne souterraine.

Le 7 septembre, le câble de Marseille à Oran était ouvert à la correspondance publique et le trafic s'y développe avec une telle rapidité que le service devra s'y faire en duplex dès que l'administration en aura pris livraison définitive. Les résultats obtenus font autant d'honneur aux administrateurs de la Société générale des Téléphones qui ont dirigé la construction et la pose du câble qu'à leurs ingénieurs et électriciens, MM. Seaton, chef de l'expédition, Smith, Stallibrass, Rouillard, Sullivan, Fournier, Coquille et au commandant du *François-Arago*, M. le capitaine Bonnaud.

Nous reproduisons ci-après les types des états auxquels nous faisons allusion plus haut :

DATES	NUMÉROS des bobines d'âmes	LONGUEURS des âmes en milles marins	RÉSISTANCE EN OHMS — MESURÉE			RÉSISTANCE EN OHMS — RÉDUITE PAR LE CALCUL A 24° C.		CONDUCTIBILITÉ du cuivre rapportée à celle du cuivre pur = 100	TEMPÉRATURE du cuivre	OBSERVATIONS
			totale	des fils de secours	du conducteur seul, déduction faite des fils de secours	totale, fils de secours non compris	par mille marin			
19 avril.	114	2,0140	23,12	0,61	22,51	22,607	11,225	98	22°,8	

Capacité électrostatique des âmes. (Méthode de sir W. Thomson.)

DATES	NUMÉROS des âmes	LONGUEURS des âmes en milles marins	NOMBRE d'éléments de la pile Leclanché	RÉSISTANCES EN OHMS des branches de proportion de la caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley		CAPACITÉ du condensateur de comparaison en microfarads	CAPACITÉ DES AMES APRÈS 15″ DE CHARGE				OBSERVATIONS
							totale	des fils de secours	des âmes seules	par mille marin	
15 mars	79	2,0059	16	3864	6136	1	0,6297	0,021	0,6087	0,303	

Résistance d'isolement des âmes à 24° C.

DATES	NUMÉROS DES AMES	LONGUEUR DES AMES en milles marins	NOMBRE D'ÉLÉMENTS de la pile d'essai (Leclanché)	TEMPÉRATURE	SHUNT DU GALVANOMÈTRE	DÉVIATION produite par la pile au galvanomètre avec un meghom			CONSTANTE EN MEGOHMS	DÉVIATIONS AU GALVANOMÈTRE après 2′ d'électrification des âmes						RÉSISTANCE TOTALE d'isolement après 2′ de charge courant —	ISOLEMENT total à 24° C.	ISOLEMENT par mille marin à 24° C.	OBSERVATIONS
						par courant −	par courant +	Moyenne		totale −	totale +	des fils de secours −	des fils de secours +	des âmes seules −	des âmes seules +				
25 avril.	293	1,4093	400	23°,5	1/597	253	253	253	151 218	173	177	2	2	171	175	884,3	827,1	1165	

Essais des soudures des âmes.

NUMÉROS des âmes reliées successivement les unes aux autres	DATES et heures de la confection des soudures	DATES et heures de l'essai des soudures	NOMBRE d'éléments de la pile d'essai (Leclanché)	CUVETTE			AMES			SOUDURES		DIFFÉRENCE entre les colonnes 10 et 12	OBSERVATIONS
				Charge immédiate	Charge après 30″ d'isolement	Perte pour 100	Longueurs en essai dans la cuvette (en mètres)	Charge après 30″ d'accumulation	Perte par l'âme corrigée de la perte par la cuvette	Charge après 30″ d'accumulation	Perte par la soudure corrigée de la perte par la cuvette		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
181/175	17 avril 9h à 10h 30	20 avril 8h m.	400	66	66	0	2	2,5	2,5	1	1	1,5	

DATES	NUMÉROS des âmes reliées successivement	LONGUEURS des âmes en milles marins	LONGUEURS EN CIRCUIT en MILLES MARINS			TEMPÉRATURE du cuivre	RÉSISTANCE				RÉSISTANCES calculées d'après les essais faits sur les bobines à 24° C. et en tenant compte de la diminution de longueur des âmes résultant de la confection des soudures	OBSERVATIONS
			armées	non armées	totales		des fils de secours	totale	du conducteur seul — mesurée	du conducteur seul — par mille marin et ramenée par le calcul à 24° C.		
......	....	....	.....	.....	.....	......	......	......	......	......	....	
27 avril.	176 185 74	6,0086	4,5400	12,4962	17,0362	9°,6	0,5	180,7	180,2	11,148	189,91	
......	....	....	.....	.....	.....	......	......	......	......	......	....	

Capacité électrostatique du câble en fabrication à la machine n°

DATES	NUMÉROS des âmes reliées successivement	LONGUEURS totales en circuit en milles marins	NOMBRE d'éléments de la pile d'essai (Leclanché)	CAPACITÉ du condensateur de comparaison	RÉSISTANCE en ohms des branches de proportion de la caisse à curseur de Thomson et Varley		CAPACITÉ MESURÉE				CAPACITÉ calculée du câble d'après celle des âmes		OBSERVATIONS
							totale	des fils de secours seuls	du câble seul	du câble par mille marin	totale	par mille marin	
......	....	....	....	....	....	....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
6 mai.	150, 175 181, 167 155, 156 176, 185 74	17,0362	16	5	5167	4833	5,34	0,03	5,31	0,312	5,27	0,309	
......	....	....	....	....	....	....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	

Résistance d'isolement du câble en fabrication à la machine n°

DATES	NUMÉROS DES AMES RELIÉES	LONGUEURS en circuit: Armées de fer	LONGUEURS en circuit: Non armées	LONGUEURS en circuit: Totales	NOMBRE D'ÉLÉMENTS de la pile d'essais (Leclanché)	RÉSISTANCE DU GALVANOMÈTRE	TEMPÉRATURE DU CUIVRE	CONSTANTE: Shunt $\frac{S}{G+S}$	CONSTANTE: Déviations à travers 1 megohm: −	CONSTANTE: Déviations à travers 1 megohm: +	CONSTANTE: Déviations à travers 1 megohm: Moyenne	CONSTANTE: Constante en megohms	CABLE: Shunt du galvanomètre	CABLE: Déviations après 2′ d'électrification: des fils de secours: −	CABLE: Déviations après 2′ d'électrification: des fils de secours: +	CABLE: Déviations après 2′ d'électrification: des fils de secours et du câble: −	CABLE: Déviations après 2′ d'électrification: des fils de secours et du câble: +	CABLE: Déviations après 2′ d'électrification: du câble seul: −	CABLE: Déviations après 2′ d'électrification: du câble seul: +	CABLE: Isolements totaux après 2′ d'électrification: Observés	CABLE: Isolements totaux après 2′ d'électrification: Ramenés par le calcul à 24° C.	CABLE: Isolements par mille marin après 2′ d'électrification: Observés	CABLE: Isolements par mille marin après 2′ d'électrification: Ramenés par le calcul à 24° C.	ISOLEMENTS calculés d'après ceux des âmes: Totaux	ISOLEMENTS calculés d'après ceux des âmes: Par mille marin	AUGMENTATION POUR 100 de l'isolement durant la fabrication	OBSERVATIONS
26 avril 1892	150 175 141 167 155 156	2,7559	8,2717	11,0276	200	5900	13°	1/591	128	128	128	7,5648	∞	2	»	137	»	135	»	560,3	128,7	6179	1 419	93,04	1026	38	

NUMÉROS d'ordre	DATES	AMES Numéro	AMES Longueur de l'âme ajoutée à la section	AMES Longueur totale	RÉSISTANCE du cuivre à 24° C. de l'âme	RÉSISTANCE totale	RÉSISTANCE par mille marin	CAPACITÉ de l'âme	CAPACITÉ totale	CAPACITÉ par mille marin	ISOLEMENT A 24° C. des âmes par mille marin R	$\frac{L}{R}10^2$	$\sum\frac{L}{R}10^2$	$\frac{1}{\sum\frac{L}{R}}$ Isolement total	Isolement par mille marin de la section
....	......	.....	.....	.....	....	....	....	....	.....	....	....	....	....	....	....
52	......	.....	.....	92,8758	....	1038,966	....	....	28.3166	....	....	....	8,1127	....	....
53	23 avril 1892	254	2,0157	94,8915	22,608	1061,574	11,213	0,6122	28,9288	0,3048	1120	0,1800	8,2927	12,06	1144
....	......	.....	.....	.....	....	....	....	....	.....	....	....	....	....	....	....

Horaire de l'immersion du câble.

DATES et heures	VITESSE du navire d'après les lochs	NOMBRE de tours par minute de la machine motrice	POSITIONS du navire d'après les observations Longitudes	POSITIONS Latitudes	CHEMINS parcourus	NOMBRE de tours du tambour de pose	LONGUEURS de câble déroulées en milles marins	MOU pour 100	PROFONDEURS de la mer en brasses	TENSIONS du câble en kilogr.	RÉSISTANCES du cuivre	ISOLEMENTS en meghoms	ANGLES d'immersion	OBSERVATIONS — État de la mer, direction du vent, température, passage des épissures, changement de route, changement de cuves, dérive, etc.

E. Wünschendorff.

LES

NOUVEAUX ATELIERS DES SERVICES ÉLECTRIQUES

DE LA COMPAGNIE

DU CHEMIN DE FER DU NORD A S^T-OUEN-LES-DOCKS

Les applications de l'électricité ont pris, depuis une dizaine d'années, à la Compagnie du chemin de fer du Nord, un assez grand développement (*).

Le réseau télégraphique et téléphonique présente plus de 8.900 kilomètres de ligne avec 1.500 postes; les installations du block-système et des appareils qui en dépendent s'étendent sur 1.129 kilomètres de ligne à une voie et à deux voies et comportent 590 postes; les grosses sonneries d'annonce des trains en usage sur les lignes à simple et à double voie sont au nombre de 2.555; les signaux ou aiguilles, manœuvrés à distance, sont pourvus d'appareils électriques de contrôle au nombre de 6.200; les contacts fixes reliés aux disques à distance sont au nombre de 1.027; de nombreux avertisseurs de diverses natures fonctionnent sur le réseau; et enfin 18 usines ayant une puissance totale de 1.200 chevaux-vapeur (**) fournissent le courant à 25 gares (***), soit pour l'éclairage par l'arc ou l'incandescence des voies ou des bâtiments, soit pour le fonc-

(*) *Revue générale des chemins de fer*, août 1892.
(**) Ce nombre sera prochainement porté à 26 usines et 2.000 chevaux.
(***) Ce nombre sera prochainement porté à 37 gares.

tionnement des engins électro-mécaniques, tels que les cabestans, les treuils, les grues, etc., soit pour la charge des accumulateurs qui se substituent dans une certaine période de la journée aux machines dynamos-électriques, soit enfin pour la charge des accumulateurs qui servent aux essais d'éclairage électrique des trains.

Jusqu'à ce jour, les divers établissements des Services électriques, ateliers, laboratoires, magasins, bureaux, etc., étaient répartis dans des locaux séparés les uns des autres et dont quelques-uns, comme l'atelier, étaient installés dans les bâtiments mêmes de l'Administration centrale où ils n'étaient évidemment pas à leur place.

Afin de donner à ces établissements les dimensions et l'unité qui leur étaient nécessaires, la Compagnie décida, sur la proposition de M. A. Sartiaux, Ingénieur en chef de l'exploitation, le transport et la concentration de tous les établissements des Services électriques à *St-Ouen-les-Docks*, a proximité de la station des trains-tramways dite du *Quai de Seine*.

Le programme de l'installation, tracé par M. A. Sartiaux, comportait la suppression de la machine à gaz qui entraînait les transmissions actionnant les outils dans les anciens ateliers : Il avait remarqué combien le travail de chacun des outils qui existaient dans ces ateliers, comme celui des cabestans (*) et des grues dans les gares et, en général, de la plupart des appareils de manœuvre était intermittent et en avait conclu à l'intérêt que présenterait, au point de vue de la dépense d'exploitation, une commande électrique ali-

(*) *Revue générale des chemins de fer :* Note sur les cabastans électriques. Juillet 1889, p. 51.

mentée par des accumulateurs. Cette disposition présentait, en outre, l'avantage de pouvoir employer des bâtiments plus légers (on voulait utiliser le bâtiment en planches de l'ancienne gare maritime de Calais), auxquels ne seraient plus suspendues ni les transmissions, ni les courroies, etc.

L'installation dont il s'agit présente donc, tant par ses lignes générales que par cette application nouvelle de l'électricité, des dispositions qui seront peut-être de nature à intéresser les lecteurs.

DESCRIPTION GÉNÉRALE.

En attendant la construction de la gare actuelle de *Calais-maritime*, la Compagnie avait fait construire sur le *quai des Paquebots* une gare maritime provisoire établie dans un bâtiment en bois.

C'est ce bâtiment qui, après l'achèvement de la gare définitive actuelle, fut transporté à l'extrémité de la gare St-Ouen-les-Docks dans un terrain (*fig.* 16, p. 66) bordé, au Nord par le quai de Seine (*chemin de grande communication n°* 39), au Sud, par la gare aux pierres et aux fers des Docks, à l'Ouest par la rue Lamonta et à l'Est par la station des trains-tramways de Paris à St-Ouen dite du Quai de Seine.

L'ensemble des parties couvertes représente une superficie de 1.890 mètres carrés et les cours et chantiers non couverts une superficie de 6.014 mètres carrés, soit au total 7.904 mètres carrés. Ces installations sont desservies par une voie reliée à la gare des Docks. Cette voie dessert en même temps les ateliers et magasins de la *Société pour le Travail électrique des Métaux* et de la *Société d'Éclairage et de Force par*

l'Électricité situés de l'autre côté de la rue Lamonta. Les wagons de ou pour cet embranchement sont amenés ou retirés à l'aide d'un cabestan électrique placé en *c* (*fig.* 16).

Parallèlement au bâtiment et à la rue Lamonta se trouve une seconde voie, reliée par plaque à la première et à la gare aux pierres et aux fers de St-Ouen, où se font les chargements et déchargements des objets et matières de détail à expédier ou en provenance du réseau.

Enfin, une troisième voie, constituée avec des rails légers de 20 kilogrammes, a été posée au milieu des chantiers pour la manœuvre de la grue de 3.500 kilogrammes qui sert aux chargements et déchargements des poteaux télégraphiques, sémaphores, etc., et, en général, de toutes les pièces lourdes dont les dépôts sont répartis dans les cours.

Le bâtiment proprement dit comporte un magasin (*fig.* 17, p. 67) pourvu, à l'étage, d'une galerie qui règne tout autour de la construction et à laquelle on accède par trois escaliers. Ces galeries sont réunies entre elles dans le milieu du magasin par une passerelle très légère en fer, qui permet aux commis de magasin de circuler facilement dans toute leur étendue.

Au rez-de-chaussée se trouvent rangés tous les objets lourds et encombrants, tels que machines, bois, boulons, isolateurs, ferrures, etc. Dans les galeries, disposés dans des casiers, sont tous les appareils électriques de réserve ainsi que les pièces et le matériel de rechange de peu de volume et de poids.

Également au rez-de-chaussée, dans l'axe du bâtiment, sont établis une série de comptoirs sur lesquels se font le classement des expéditions et les emballages.

Les livraisons des fournisseurs et les appareils réparés ou montés par les ateliers sont déposés pour la vérification dans une salle dite *des réceptions* située en A. Les appareils et le matériel à réparer sont classés dans une autre salle située en B, où ils sont pris dans l'ordre des commandes pour être remis aux ateliers.

Enfin, les grosses pièces sont chargées sur des chariots, pour être conduites aux wagons, à l'aide de palans différentiels d'une force de 3.000 kilogrammes chacun, fixés aux fermes de grue des bâtiments aux quatre points C, C, C, C, des bâtiments.

Dans les annexes des magasins qui se trouvent dans les cours sont déposés les fontes et les fers, les poteaux télégraphiques, les sémaphores, et, en général, tous les objets et le matériel encombrant et lourd qui peuvent sans inconvénient rester exposés aux intempéries des saisons.

Les magasins et les annexes sont éclairés par douze lampes à arc de $^{12}/_{15}$ et de $^{6}/_{8}$ ampères montées en tension deux par deux.

Les bureaux de l'Inspecteur chargé de la direction des magasins, ateliers et laboratoires, du Garde-magasin général et des comptables sont établis à l'étage et occupent une surface de 80 mètres carrés ; ils sont chauffés au gaz et éclairés par l'incandescence. Ces bureaux sont séparés des magasins et ateliers par des cloisons complètement vitrées qui rendent facile la surveillance du personnel des divers services.

Les laboratoires de physique et de chimie sont situés au rez-de-chaussée. Les essais et vérifications des matériaux et des appareils électriques sont faits dans le laboratoire de physique, pourvu d'une série

très complète d'appareils pour les mesures de résistance, d'isolement, de photométrie, etc. Il a à sa disposition un courant électrique d'une intensité très élevée fourni par la *Société d'Éclairage et de Force* dont l'usine est voisine, comme il a été dit plus haut.

Le laboratoire de chimie effectue toutes les analyses des matières employées couramment pour les besoins du service.

Ces deux laboratoires sont également chauffés au gaz et éclairés par l'incandescence.

Dans la partie couverte des ateliers sont installés l'atelier de mécanique et toutes les machines-outils, l'atelier de peinture, l'atelier pour le retaillage des limes par l'électricité et l'atelier d'ébénisterie et de menuiserie.

Dans la cour se trouve un chantier pour le montage et la réparation des grosses pièces et la forge à deux feux.

L'atelier de mécanique est partie au rez-de-chaussée et partie à l'étage en galerie. D'un côté de la galerie se trouvent les ouvriers qui s'occupent spécialement de la réparation des pièces d'horlogerie ou autres ne demandant que rarement l'emploi des gros outils; de l'autre côté, les menuisiers et les ébénistes.

Le plan du bâtiment (*fig.* 17) indique la répartition des installations.

Le bureau du Chef d'atelier et du Comptable de l'atelier, où se renferme également le petit outillage, se trouve au rez-de-chaussée et prend jour sur les ateliers.

Les ateliers sont éclairés par une lampe à arc et chaque étau par une lampe à incandescence. Ils sont chauffés par un fort poêle à coke; l'emploi du gaz eût



été trop coûteux en raison du volume d'air à chauffer.

Enfin, en R a été aménagée une salle de 20 mètres carrés qui sert de réfectoire pour le personnel des magasins et ateliers. Cette salle, chauffée au gaz, est pourvue d'une série de réchauds à gaz utilisés par le personnel pour faire chauffer les aliments qu'ils apportent pour leur déjeuner.

L'ensemble de ces installations est mis, en dehors des heures de service, sous la surveillance d'un gardien qui occupe la maison bâtie en M (*fig.* 16), entourée d'un jardin dont il a la jouissance.

DESCRIPTION DE LA COMMANDE ÉLECTRIQUE DES MACHINES-OUTILS.

Les machines-outils en usage dans les ateliers sont toutes mises en mouvement par des moteurs électriques. Dans l'ancienne installation, cette commande était faite par une transmission entraînée par un moteur à gaz de la force de douze chevaux.

Les études que nous avons faites avec les chefs habiles de la maison *Hillairet et Huguet* pour réaliser le programme tracé par M. A. Sartiaux, tout en employant les machines-outils existantes, sans leur faire subir de transformation radicale trop coûteuse nous ont conduit à adopter les solutions suivantes que nous examinerons, pour en faciliter la description, en divisant les machines-outils en trois groupes : le premier groupe comprenant les tours de toutes dimensions, le deuxième groupe les machines à percer de différents modèles et le troisième groupe les machines diverses, raboteuses, fraiseuses, ventilateurs, meule, etc.

Fig. 1 et 2. — Tours.

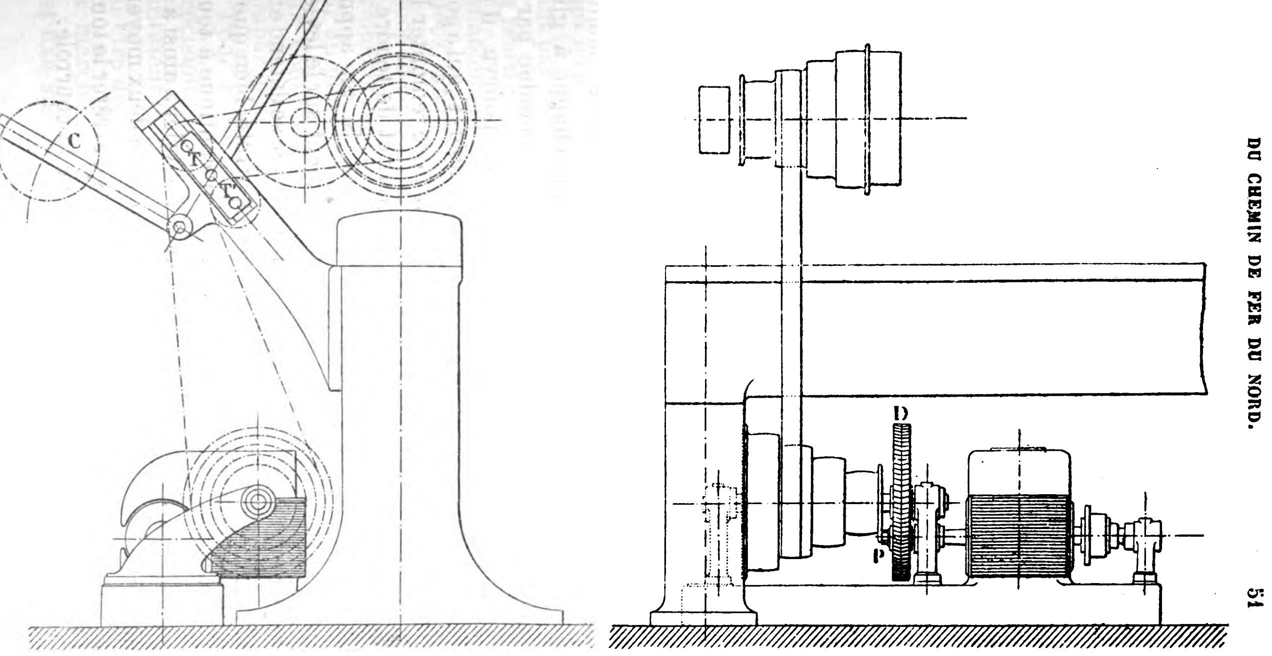


Fig. 1. — Vue par bout.

Fig. 2. — Élévation longitudinale.

Tours. — Les tours sont au nombre de sept commandés de trois manières différentes :

Le tour à cylindrer à banc rompu, le tour à cylindrer à cuvette à banc droit et le tour moyen sont commandés par un moteur (*fig.* 1 et 2) électrique à un seul électro d'une puissance de 1.100 watts.

Ce moteur, placé au pied des tours et du côté opposé à celui où l'ouvrier se tient, est monté sur une plate-forme en fonte qui lui sert d'assise. L'arbre de l'anneau porte un pignon P qui commande une roue dentée à chevron D dont l'axe porte le cône d'entraînement habituel.

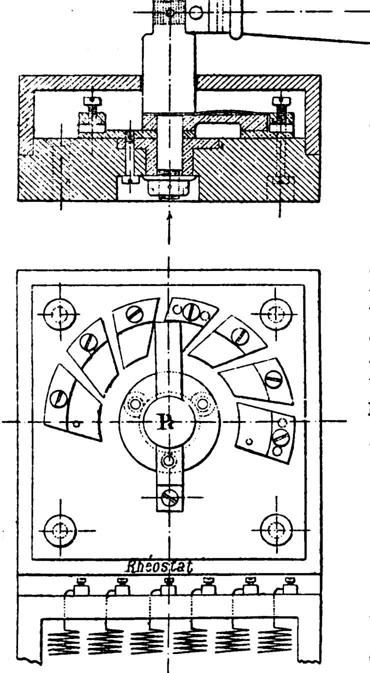


Fig. 3. — Commutateur simple.

Les deux brins de la courroie qui relie ce cône à celui fixé sur le tour passent sur deux rouleaux tendeurs T, T′ montés sur une chappe à glissière commandée par le levier L pourvu d'un contre-poids C, qui a pour but de faire remonter les rouleaux et de tendre la courroie. Si on appuie légèrement sur le levier, la courroie se détend et le tour s'arrête, bien que le moteur continue à tourner : l'ouvrier a ainsi à sa disposition deux moyens rapides d'arrêter le tour : le commutateur et le levier tendeur de la courroie.

Le commutateur-rhéostat de mise en marche est représenté par la *fig.* 3.

Il ne présente rien de particulier, en dehors de la commande qui a été disposée de manière que l'ouvrier puisse en faire la manœuvre à la portée de la main. A cet effet, l'axe du commutateur R a été prolongé par une tringle dont l'extrémité est munie d'un bras de levier auquel sont reliées deux cordes ; en tirant sur la première corde, on dirige la clef du commutateur sur courant fermé en passant par une série de résistances convenablement graduées, tandis que la seconde corde sert à ramener cette clef sur un plot isolé et par conséquent à couper le courant.

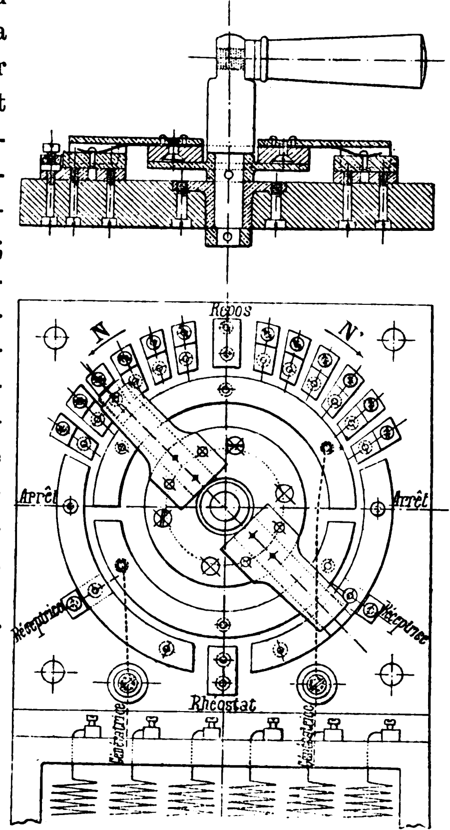


Fig. 4. — Commutateur double.

Pour le tour de précision, le commutateur (*fig.* 4) a dû être disposé pour permettre la marche en avant et la marche en arrière, très rapidement. Cet appareil est fixé sur le tour même devant l'ouvrier; en le ma-

nœuvrant dans la direction de la flèche]N, le tour tourne dans un sens; si on reporte la manette de ce commutateur dans la direction de la flèche N′, le tour se met instantanément à tourner dans le sens opposé.

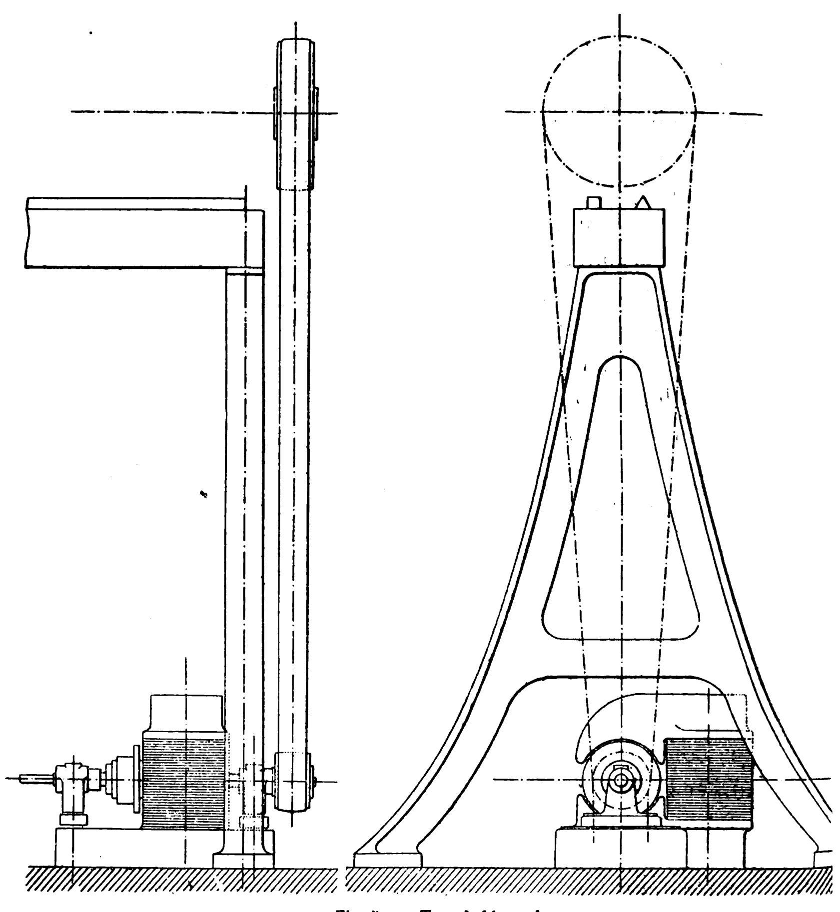


Fig. 5. — Tour à dégrossir.

Les deux tours à polir et à dégrossir, qui sont d'anciens tours à pédale et au pied, sont commandés par

des moteurs électriques de 300 watts à un seul électro. Pour l'un d'eux (*fig.* 5), la poulie de commande est reliée par une courroie au moteur placé sous le tour même. Pour l'autre (*fig.* 6), le moteur est suspendu

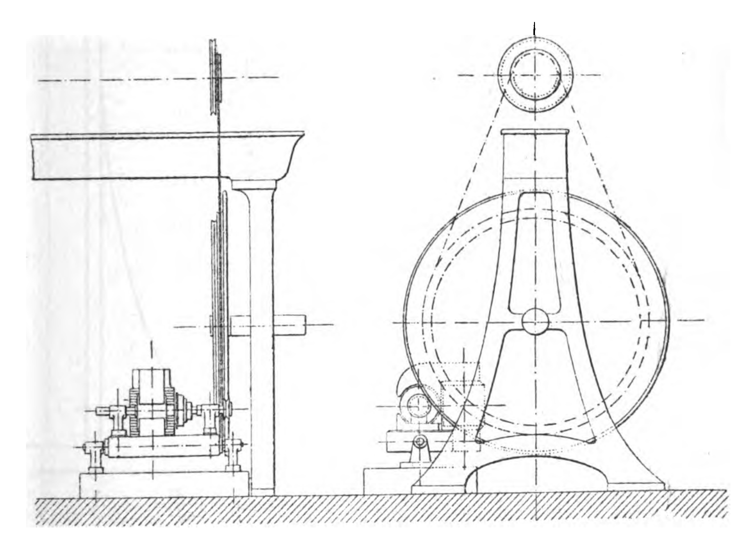


Fig. 6. — Tour à polir.

sur un axe et entraîne le volant du tour par la friction d'un galet en acier sur du cuir qui garnit la jante du volant. — La suspension du moteur a été réalisée pour obtenir, par le poids de l'appareil, un meilleur contact entre le galet et le volant.

Les commutateurs-rhéostats de mise en marche sont fixés sur les deux tours à la portée de la main de l'ouvrier et sont du modèle indiqué plus haut (*fig.* 3).

Enfin, les deux tours à verge, destinés au nettoyage des petites pièces d'horlogerie, sont actionnés par un petit moteur à huit pôles de 65 watts (*fig.* 7) placé sous le banc sur lequel sont fixés ces tours; la com-

mande est faite par l'intermédiaire d'une corde à boyaux. Les commutateurs-rhéostats de mise en marche sont également fixés sous les bancs et à la portée de l'ouvrier.

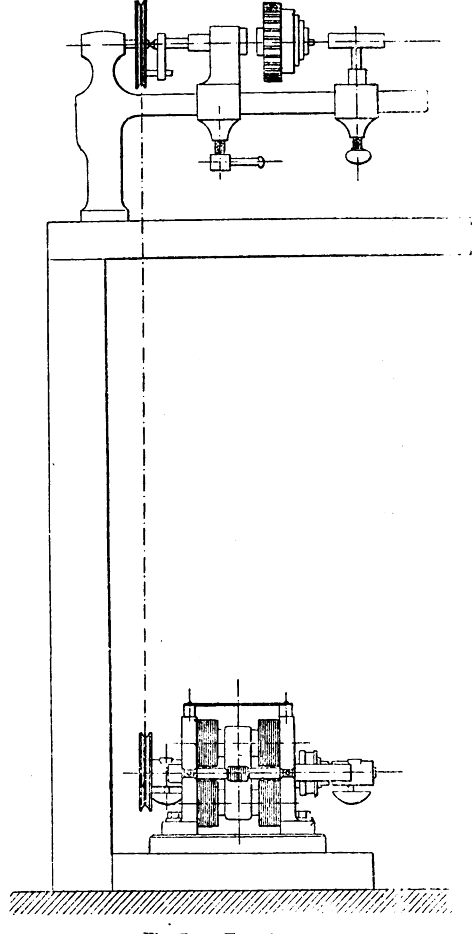


Fig. 7. — Tour à verge.

Machines à percer. — Les machines à percer sont

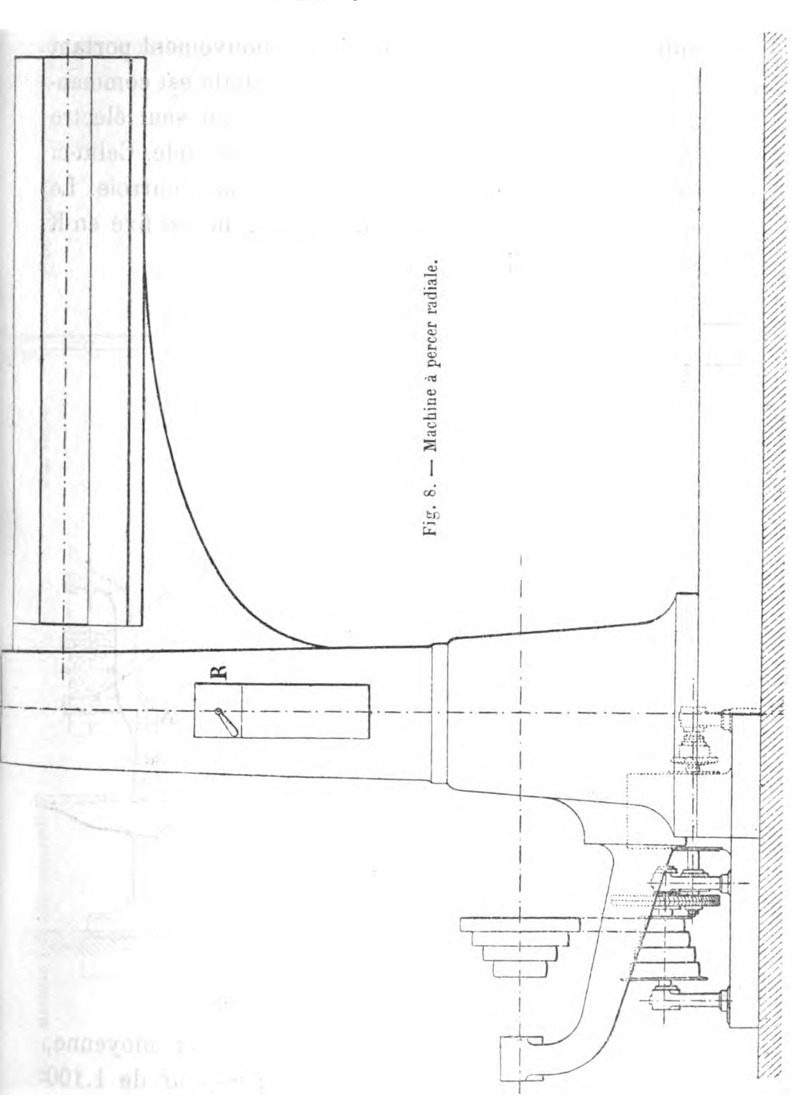


Fig. 8. — Machine à percer radiale.

au nombre de cinq : les vitesses variables et relativement lentes que doivent faire ces outils ont également

obligé l'installation de renvois de mouvement portant les cônes. — La machine à percer radiale est commandée par un moteur de 1.100 watts à un seul électro (*fig.* 8) dont l'axe porte le cône de commande. Celui-ci est relié au cône de la machine par une courroie. Le commutateur-rhéostat de mise en marche est fixé en R sur la colonne de l'outil.

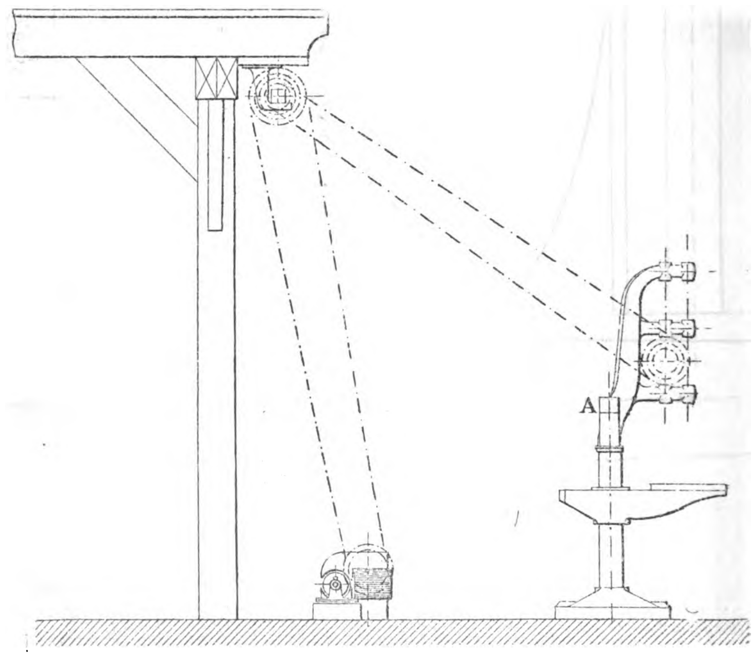


Fig. 9. — Machine à percer, grosse et moyenne.

Les deux machines à percer, grosse et moyenne, sont actionnées : la première par un moteur de 1.100 watts et la seconde par un moteur de 300 watts. La *fig.* 9 représente les dispositions adoptées pour les renvois de mouvement. Ceux-ci sont placés sous le plan-

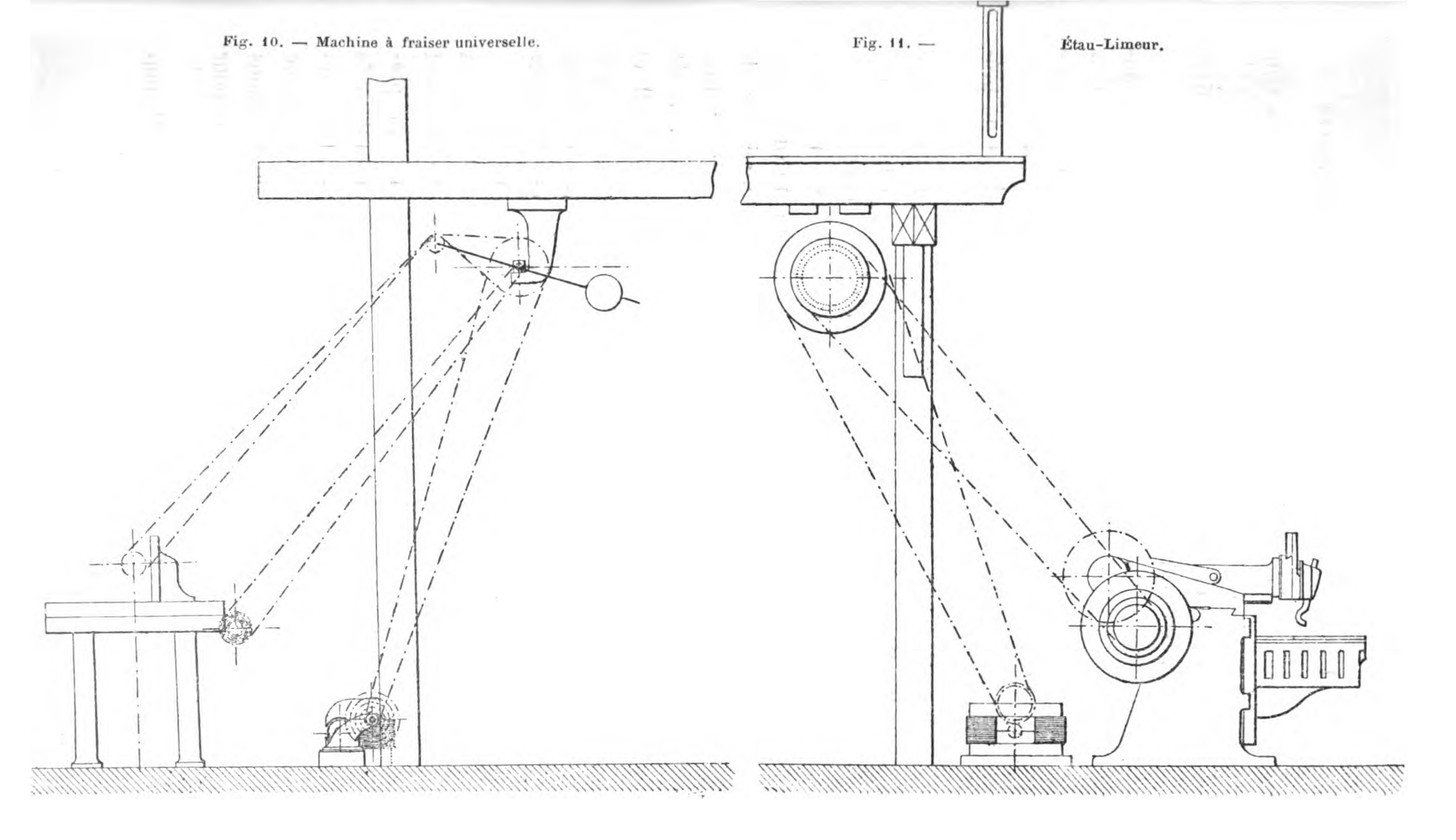


Fig. 10. — Machine à fraiser universelle.

Fig. 11. — Étau-Limeur.

cher de la galerie et du côté opposé où l'ouvrier se tient pour le travail.

Les commutateurs de mise en marche sont fixés sur les outils eux-mêmes en A.

Enfin, les deux petites machines à percer sont munies d'un moteur de 65 watts. Pour l'une, le moteur est placé au pied de l'outil; pour l'autre, il est fixé sous le plancher de la galerie avec un renvoi de mouvement destiné à réduire la vitesse. Ces installations ne présentent rien de particulier.

Machines diverses. — Les machines diverses sont au nombre de sept : la machine à fraiser universelle et l'étau-limeur sont commandés par des moteurs électriques de 1.100 watts; les installations de renvoi de mouvement (*fig.* 10 et 11) sont celles que j'ai indiquées plus haut pour les machines à percer grosse et moyenne.

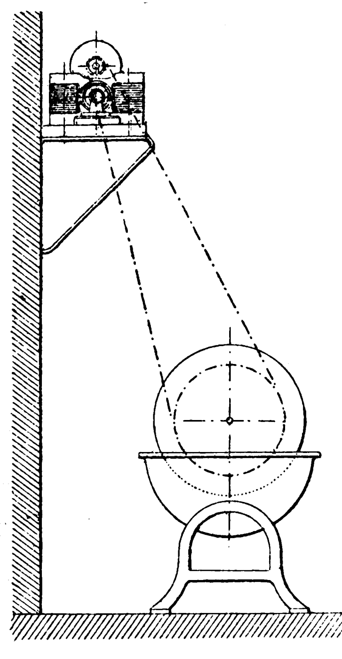


Fig. 12. — Meule.

La meule et la scie à ruban (*fig.* 12 et 13) sont commandées : la première par un moteur de 1.100 watts et la seconde par un moteur de 2.200. Les dispositions sont celles adoptées pour la machine à percer radiale.

Le ventilateur de la forge, qui est le seul outil nou-

Fig. 13. — Scie à ruban.

veau (*fig.* 14), est mis en mouvement par un moteur de 300 watts relié directement par un accouplement

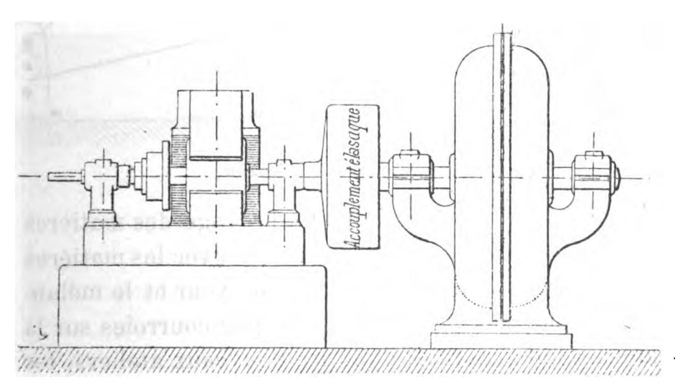


Fig. 14. — Ventilateur.

élastique genre Raffard. Cet outil, qui tourne à une vitesse de 3.000 tours par minute, fonctionne presque sans arrêt dans une journée de travail.

La perceuse portative est destinée aux travaux exécutés sur le chantier extérieur. Elle comporte un moteur de 1.100 watts auquel s'adapte un flexible. Cet outil est très connu : nous n'insisterons pas sur sa description.

En outre des machines décrites ci-dessus, les ateliers sont pourvus d'un broyeur et d'un mélangeur qui servent spécialement à la fabrication de l'encre oléique ou à tampon destinée au service des bureaux et des gares de la Compagnie. Cette encre est fabriquée dans les ateliers des Services électriques par 10.000 bouteilles à la fois.

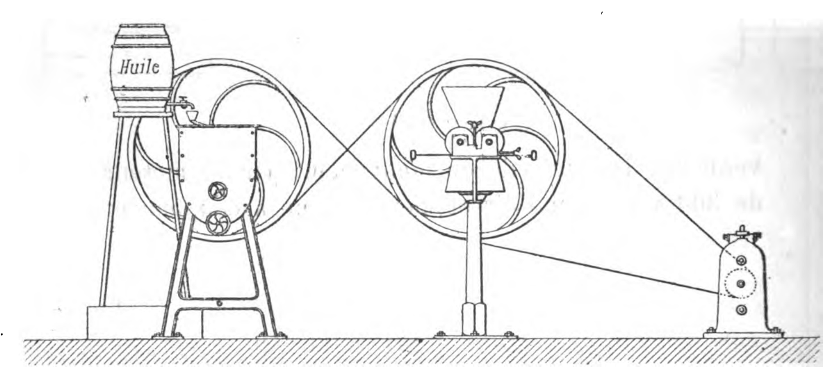


Fig. 15. — Broyeur et mélangeur.

Les opérations nécessitent un broyage des matières puis un mélange très intime de l'huile avec les matières broyées. Dans l'ancien atelier, le broyeur et le mélangeur étaient l'un et l'autre reliés par courroies sur la transmission générale; dans les nouveaux ateliers, les deux appareils fonctionnent simultanément comme

l'indique la *fig.* 15, et sont commandés par un moteur électrique qui n'est autre qu'une ancienne machine Gramme, type d'atelier, devenue sans emploi.

Cette disposition a l'avantage de ne nécessiter qu'un seul moteur électrique et permet, en outre, de mener plus rapidement la fabrication.

Les commutateurs-rhéostats de mise en marche des machines dont nous venons de parler sont identiques à ceux décrits au début de cette note (*fig.* 3).

DÉPENSES COMPARATIVES.

Les installations des machines-outils, dont nous venons de parler, sont terminées et en service depuis le mois d'octobre 1891 et ont donné des résultats satisfaisants à tous les points de vue. — Le tableau ci-après donne, pour chaque machine, la dépense à vide et en charge en ampères, en kilogrammètres et en chevaux.

DÉSIGNATION DES MACHINES		AMPÈRES	KILOGRAMMÈTRES	CHEVAUX-VAPEUR	OBSERVATIONS
Gros tour à changement de marche	Anneau à vide	2,5	28	0,375	Le courant est fourni sous un potentiel de 115 à 118.
	— en charge	5 à 6	56 67	0,750 0,900	
Tour moyen	— à vide	6	67	0,900	
	— en charge	10 à 12	112 135	1,500 1,800	
Petit tour monté à friction	— à vide	3,5	39	0,525	
	— en charge	5 à 6	56 67	0,750 0,900	
Tour de précision	— à vide	5	56	0,750	
	— en charge	8	90	1,200	
Tour d'horlogerie, 1er étage	— à vide	2,5	28	0,375	
	— en charge	4	45	0,600	
Petit tour à polir	— à vide	3	34	0,450	
	— en charge	5	56	0,750	
Petite perceuse, 1er étage	— à vide	2,5	28	0,375	
	— en charge	4	45	0,600	
Grande radiale	— à vide	3	34	0,450	
	— en charge	7	79	1,050	
Grosse perceuse	— à vide	4	45	0,600	
	— en charge	8	90	1,200	
Perceuse moyenne	— à vide	4	45	0,600	
	— en charge	6	67	0,900	
Perceuse Huré petite	— à vide	3	34	0,450	
	— en charge	5	56	0,750	
Machine à fraiser	— à vide	11,4	128	1,710	
	— en charge	15	167	2,250	
Étau-limeur	— à vide	9	102	1,350	
	— moitié charge	11	124	1,650	
	— pleine charge	15	167	2,250	
Meule	— à vide	4	45	0,600	
	— en charge	7	79	1,050	
Scie à ruban	— à vide	8	90	1,200	
	— en charge	9,5	104	1,425	
Ventilateur	— à vide	7	79	1,050	
	— en charge	8	90	1,200	
Broyeur et mélangeur	— à vide	10	112	1,500	
	— en charge	12	135	1,800	

Il est à remarquer que, pour ne pas multiplier les types de moteurs, on s'est borné à trois modèles ; il en résulte qu'ils ont une puissance très supérieure au travail à produire. — C'est un avantage qui en assure la bonne conservation.

Depuis la mise en service de ces installations la consommation journalière moyenne de courant a été de 11 kilowattheures. — Le courant est fourni par l'usine de la *Société d'Éclairage et de Force*, située de l'autre

côté de la rue Lamonta, au prix de 0^{f},38 le KWH. C'est donc une dépense journalière de 4^{f},18. Le courant dépensé est enregistré par un compteur Aron. A ce chiffre, il faut ajouter les frais d'entretien des moteurs électriques, graissage, main-d'œuvre, renouvellement des balais, etc., qui représentent, d'après les pièces comptables, une somme de 30 francs par mois ou 1 franc par jour, soit au total 5^{f},18 pour l'ensemble d'une journée.

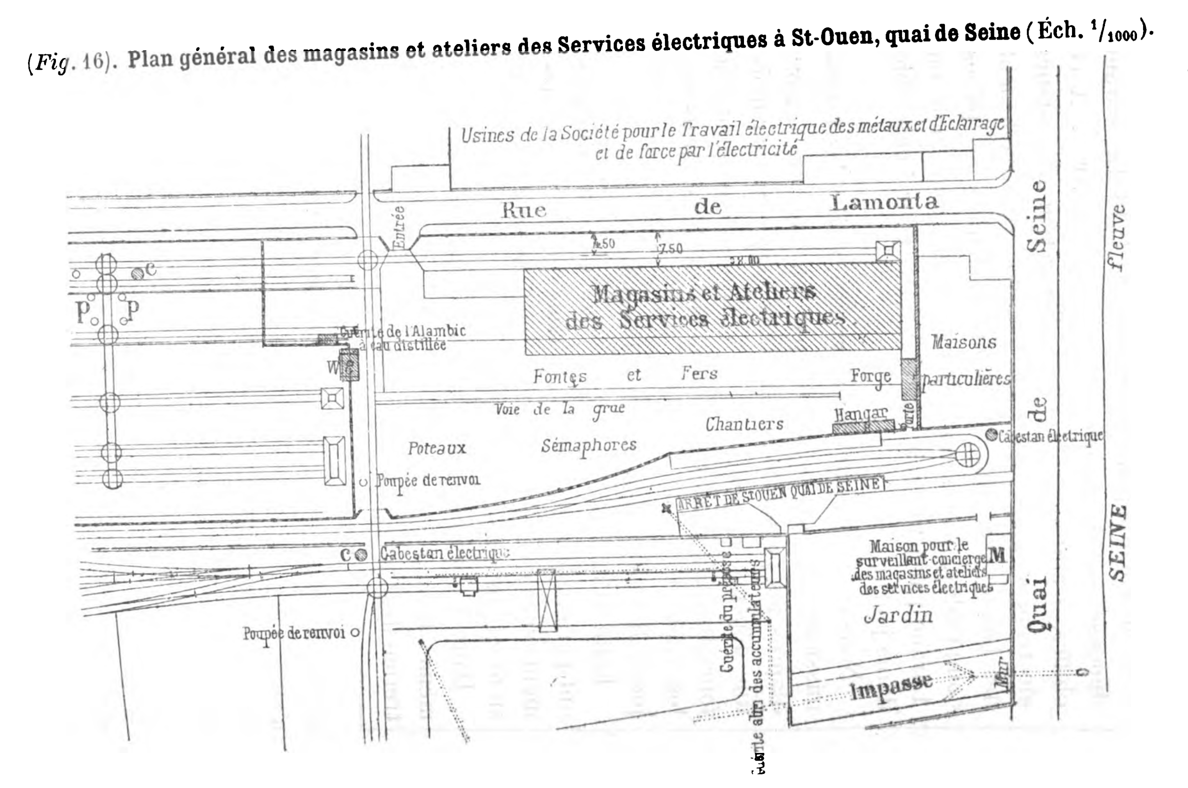
Nous avons vu que dans l'ancien atelier les transmissions étaient conduites par un moteur à gaz; d'après les pièces comptables, ils exigeaient par mois une dépense moyenne de 415 francs comprenant la fourniture du gaz et de l'eau, les chiffons, graisses, les réparations et main-d'œuvre, soit une dépense journalière d'un peu plus de 13 francs.

Enfin, il faut ajouter que les nouvelles installations ont permis de supprimer un homme qui était spécialement chargé de l'entretien du moteur, des transmissions et des machines-outils.

Dans la situation actuelle les ouvriers font eux-mêmes le samedi, pendant deux heures, le service d'entretien des moteurs et des outils.

Eugène Sartiaux.

(*Fig.* 16). **Plan général des magasins et ateliers des Services électriques à St-Ouen, quai de Seine (Éch. 1/1000).**



(*Fig.* 17). **Magasins et ateliers des Services électriques** (Échelle $^1/_{400}$).

Coupe DE

Coupe FG

Plan de l'Etage

Galerie

Passerelle

Galerie

Bureau

Bureau

Galerie

Galerie menuisiers

Plan du Rez-de-Chaussée

E G

Magasins

Chef d'atelier et outillage

Chambre d'essai des dynamos

Laboratoire de Physique

Ateliers

A Salle des réceptions

B Appareils à réparer

R Réfectoire

Laboratoire de Chimie

Atelier de Peinture et de Retaillage des limes

D F

LES

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ÉLECTRICITÉ

Un cours d'électricité industrielle vient d'être institué à l'École professionnelle supérieure des Postes et des Télégraphes : M. de Nerville en a été chargé. Nous croyons intéressant de donner ici sa première leçon, qui présente un résumé d'ensemble de l'histoire de l'industrie électrique et indique en même temps le programme du cours. (Note du C. de R.)

Les applications industrielles de l'électricité dont je vais avoir l'honneur de vous entretenir sont nombreuses et d'une grande diversité et, à prendre à la lettre ce terme d'applications industrielles, on pourrait dire qu'il comprend la presque totalité des si nombreuses utilisations du courant électrique.

Où commence, en effet, le domaine de l'industrie ? La télégraphie électrique elle-même, la téléphonie, ne constituent-elles pas de grandes exploitations industrielles gérées, suivant les pays, par l'État ou par les compagnies privées? Et les multiples services que l'électricité rend aux chemins de fer pour la manœuvre de leurs signaux, de leurs appareils de sécurité, etc., ne relèvent-ils pas de la véritable industrie au même titre que l'éclairage électrique, la galvanoplastie ou le transport de l'énergie mécanique ?

J'avoue qu'à première vue, les limites rationnelles des matières qui doivent faire l'objet de ce cours, paraissent difficiles à poser et je serais singulièrement

embarrassé si, par bonheur, je ne le trouvais très exactement circonscrit par l'étendue des questions que traiteront devant vous vos autres professeurs.

Vos professeurs de télégraphie électrique, de télégraphie sous-marine, de téléphonie, vous exposeront tout ce qui a trait à la transmission des signaux et, par le cours consacré spécialement à l'électro-chimie, vous connaîtrez les nombreuses applications très industrielles de l'électricité qui tiennent à l'électrolyse des corps composés.

Il nous restera donc seulement à voir ensemble les générateurs d'électricité utilisés dans l'industrie, machines ou accumulateurs, les sources de lumière électrique, les moteurs, en un mot toutes les applications de l'électricité au transport et à la transformation de l'énergie et particulièrement à l'éclairage. Ce champ d'études est encore fort vaste et suffira, j'espère, à nous occuper pendant les séances que nous aurons à lui consacrer.

Permettez-moi, avant de commencer, de jeter avec vous un coup d'œil sur l'histoire si rapide de l'industrie électrique : si l'on fait abstraction de la transmission des signaux télégraphiques et de l'application du courant électrique à la galvanoplastie qui, sans être bien anciennes, sont un peu plus vieilles, l'industrie électrique nous paraît âgée de moins de vingt-cinq ans. On ne peut en effet qualifier d'industrielles les premières tentatives d'éclairage électrique public faites en 1842, à Paris, par Archereau et Deleil à l'aide de piles et de lampes à arc. A partir de cette date cependant, l'usage des lampes à arc dans certaines circonstances exceptionnelles se répandit peu à peu : sortant des laboratoires, ces lampes furent utilisées à l'Opéra

pour les grands jeux de lumière, puis dans quelques chantiers de construction à Paris. La première machine électrique capable de fournir un courant utilisable et de lutter avec les piles Bunsen, la machine de l'Alliance, fut construite par Nollet en 1849. C'est cette machine qui, seize années plus tard, en 1865, fut installée au cap de la Hève pour entretenir la lumière des premiers phares éclairés électriquement. Malgré ses grandes dimensions, sa lourdeur, sa médiocre utilisation spécifique, cette machine constituait déjà un immense progrès sur les petits engins électromoteurs que quelques physiciens avaient construits auparavant. Quant aux moteurs électriques, ils n'étaient encore représentés, malgré les patientes et ingénieuses recherches de mécaniciens tels que Froment, que par des jouets d'enfants incapables de vaincre le moindre effort. Les livres les plus sérieux de l'époque affirment que l'électricité peut, dans des moteurs convenables, produire de très grandes vitesses, mais qu'il lui est impossible de développer un travail utilisable.

En 1867, un nouveau progrès fut réalisé par Siemens et Wheatstone qui, simultanément, imaginèrent l'auto-excitation des machines et inventèrent la dynamo. A cette même date de 1867, à l'Exposition universelle de Paris, la petite machine de Ladd fut considérée par tous les physiciens comme une véritable merveille.

Ce n'est qu'en 1869 que parut l'admirable découverte de Gramme, et il est permis de dire que l'invention de l'anneau Gramme a été le point de départ et la cause première des progrès si extraordinaires qui, se succédant d'année en année, de mois en mois, avec une rapidité dont aucune autre branche de la science

ne peut donner un exemple ont, en moins de vingt ans, créé de toutes pièces une industrie considérable et aujourd'hui indispensable.

Quel que soit le très grand mérite de Paccinotti, qui en 1860, près de dix ans avant Gramme, avait à Pise réalisé un anneau fondé sur le même principe, la gloire de Gramme reste intacte : la petite machine de Paccinotti n'est pas sortie du laboratoire de Pise, elle y est restée dix ans oubliée; et la machine de Gramme est, en quelques mois, devenue l'un des outils les plus perfectionnés et les plus populaires de l'industrie moderne.

Depuis cette date mémorable de 1869, l'industrie électrique marche à pas de géants : d'innombrables types de machines apparaissent dans tous les pays, se perfectionnant rapidement. En 1878, grâce à Jablochkoff, l'avenue de l'Opéra, à Paris, est la première voie publique éclairée électriquement d'une manière permanente ; en 1880, la lampe à incandescence est construite en Amérique et fait son apparition en France, à l'Exposition d'électricité de 1884, où l'importance de l'industrie électrique éclate aux yeux pour la première fois et s'impose à l'étonnement général.

Vers la même époque, l'accumulateur inventé par Planté, avant 1860, reçoit les perfectionnements qui le rendent industriel. Vers 1882, Gaulard invente le générateur secondaire ou transformateur. Ce n'est qu'en 1885 que s'installent les premières stations françaises d'électricité dans quelques petites villes des départements de l'Est. Paris attend jusqu'en 1889 l'ouverture de sa première station d'éclairage électrique.

Les premières expériences de transport d'énergie

fondées sur la réversibilité de la machine Gramme ont été faites par M. Fontaine, à Vienne, en 1873. M. Marcel-Deprez entreprit ses célèbres expériences publiques de transport industriel à Paris et à Munich en 1882, à Grenoble en 1883, entre Paris et Creil en 1885.

Ce mode de transport a reçu depuis de nombreuses applications pratiques surtout dans les régions montagneuses et, dans cet ordre d'idées, nous venons de voir naître l'année dernière en Italie d'abord, puis en France, en Suisse, en Allemagne, toute une nouvelle classe d'applications de l'électricité qui paraît devoir être féconde en résultats utiles, je veux parler du transport de l'énergie électrique par courants électriques polyphasés, préconisé par Ferraris, en Italie, par Leblanc, à Paris et en Suisse par la société d'Oerlikon.

La théorie aussi de tous ces remarquables appareils est née d'hier : elle est même plus récente que l'usage des engins auxquels elle se rapporte, car, si maintenant quelques-uns des progrès réalisés par les constructeurs sont dictés par les prévisions du calcul, la plupart des grandes inventions électriques sont nées spontanément et les appareils ont commencé à fonctionner avant qu'aucune formule eût fait prévoir leurs propriétés. Il nous paraît même remarquable aujourd'hui que tant d'erreurs grossières aient pu être dites et écrites par les physiciens au moment où les premières machines sortant des mains de leurs constructeurs, ont commencé à tourner.

On ne doit pas oublier que la première théorie des machines à courants alternatifs a été donnée par M. Joubert en 1879. Avant lui, tous les physiciens admettaient, sans d'ailleurs oser l'expliquer, que la résis-

tance électrique d'une bobine change suivant que cette bobine est en repos ou en mouvement. M. Joubert a été le premier a définir exactement le rôle de la self-induction et à attribuer à son intervention les prétendues variations de la résistance électrique de l'induit. Depuis, de nouveaux points de la théorie ont été élucidés, des études expérimentales plus détaillées ont été entreprises, mais les formules établies par M. Joubert sont restées les bases incontestées de la théorie des machines dynamos.

Actuellement encore, les études et les recherches continuent avec activité. Des perfectionnements pratiques, d'intéressantes inventions apparaissent constamment, et les nombreuses publications des physiciens spécialistes apportent sans cesse de nouveaux développements théoriques dont le résultat immédiat est d'étendre encore le champ des applications utiles.

L'industrie électrique se trouve donc en pleine voie de transformation et de progression. D'une année à l'autre, des branches dont l'utilité même était contestée prennent une importance pratique considérable, des engins que l'on croyait suffisants sont brusquement abandonnés et remplacés par d'autres, des livres étudiés avec soin paraissent arriérés quelques mois après leur publication. Aussi un exposé de l'état de l'industrie électrique doit-il être, comme cette industrie elle-même, constamment modifié et maintenu au courant : son cadre doit être suffisamment élastique pour permettre l'introduction de développements nouveaux en même temps qu'assez logique et rationnel pour que ces développements puissent, à peu près sûrement, s'appuyer sur des bases solides et s'enchaîner facilement à la série des notions déjà acquises.

L'étude que nous allons entreprendre ensemble comprendra deux parties étroitement unies : La théorie des divers groupes d'appareils considérés, théorie autant que possible élémentaire mais suffisante pour vous donner une idée complète du principe et du fonctionnement de ces engins, et, ensuite, la description des types particuliers les plus généralement répandus.

Pour l'établissement de la partie théorique, on admettra comme connues toutes les lois générales de l'électricité : on supposera établies ailleurs toutes les définitions et formules relatives aux courants, à l'induction électrique ou magnétique, au magnétisme, etc.

Le but de toute opération industrielle est une transformation : transformation de substance brute en ses éléments utilisables, transformation de matière première en objets fabriqués, transformation d'énergie naturelle en travail mécanique. Dans tous les cas, l'expression générale du rendement est le rapport du prix du produit obtenu à la somme totale dépensée pour le produire.

Dans les applications industrielles de l'électricité, l'électricité n'est jamais un produit, elle est toujours un agent de transformation : elle ne sert que d'intermédiaire entre deux séries de transformations, l'une qui dépense de l'énergie recueillie sous une forme quelconque non électrique ; l'autre, au contraire, qui restitue de l'énergie sous une forme identique à la première ou différente. Nous ne considérerons donc l'électricité que comme un agent de transformation de l'énergie.

Il en résulte qu'une installation électrique quelconque se compose de trois parties essentielles : une

source d'électricité, une ligne conductrice, un récepteur. D'une manière générale si W représente la quantité d'énergie que la source absorbe par unité de temps, U la quantité d'énergie que le récepteur rend par unité de temps, l'expression du rendement de l'installation, est

$$\alpha = \frac{U}{W}.$$

Il semblerait donc que nous dussions être amenés à partager cet exposé en trois grandes divisions rationnelles : les générateurs d'électricité, les lignes, les récepteurs, correspondant aux trois parties essentielles distinctes d'une installation.

Une telle décision, qui paraît rationnelle au point de vue de la pratique, cesse de l'être aussitôt que l'on fait intervenir des considérations théoriques. La plupart en effet des engins qui permettent de produire de l'électricité sont réversibles et, traversés par un courant, deviennent capables de régénérer l'énergie sous sa forme première. Si donc, après avoir passé en revue les diverses sources d'électricité on étudiait les différents récepteurs, on retrouverait les mêmes appareils avec une utilisation différente.

Aussi la véritable division logique de notre étude comprendra-t-elle deux parties seulement : la première traitera des transformateurs d'énergie et la seconde de la canalisation électrique. L'ensemble de ces deux parties constituant la presque totalité du cours, sera complété par quelques chapitres de moindre importance où seront présentés un certain nombre d'appareils ou d'installations accessoires.

Nous indiquerons ici rapidement le sommaire des questions qui seront traitées :

Il nous a paru tout d'abord utile de commencer par la description des appareils de mesure industriels et l'exposé des principales méthodes servant à la détermination des constantes des courants que nous aurons à examiner. Cette partie, simple accessoire de cours fort importants professés à l'école, sera surtout descriptive et fort peu théorique.

Nous aborderons ensuite immédiatement l'étude des transformateurs d'énergie : l'énergie se présente sous quatre formes utilisables : à l'état potentiel sous forme de combustible ou plus généralement de substance capable de dégager de l'énergie actuelle par suite d'une réaction chimique ; à l'état actuel, sous forme d'énergie mécanique, de chaleur ou d'électricité ; et ces quatre formes d'énergie peuvent aisément se transformer les unes dans les autres.

Les transformateurs que nous aurons à étudier se classent donc naturellement en quatre groupes :

Les transformateurs électro-chimiques ;

Les transformateurs électro-dynamique ;

Les transformateurs électro-électriques ;

Et les transformateurs électro-calorifiques ou lumineux.

Nous étudierons successivement les quatre catégories en exposant pour chacune d'elles, d'abord la théorie générale du transformateur considéré sous les deux aspects que sa réversibilité lui donne, puis les méthodes de mesure permettant de déterminer ses constantes, enfin la description plus ou moins détaillée des principaux types utilisés par l'industrie, les avantages et inconvénients de ces types, les précautions pratiques à apporter à leur usage.

Les *transformateurs électro-chimiques* comprendront

les piles et les accumulateurs ou générateurs secondaires.

L'étude des *transformateurs dynamo-électriques* beaucoup plus importante sera plus complexe. Ces appareils se classent en effet en catégories fort distinctes suivant les courants qui les traversent. Si l'on considère l'un quelconque de ces transformateurs à un instant déterminé, il sera traversé par un courant d'intensité I sous une force électro-motrice E. Au bout d'un temps T, l'énergie mise en jeu aura pour expression :

$$W = \int_0^t IE\,dt,$$

et comme E est une fonction de l'intensité, cette énergie peut s'exprimer :

$$W = \int_0^t IF(I)\,dt,$$

I étant fonction du temps,

Il résulte de cette formule que suivant la nature de la fonction reliant l'intensité au temps, l'expression du travail se calculera plus ou moins facilement et que les propriétés de l'appareil seront tout à fait différentes.

Nous serons donc amenés à diviser les transformateurs électro-dynamiques en plusieurs groupes suivant la loi de variation de l'intensité du courant qui les traverse.

Le premier groupe, celui des dynamos à courant constant, ne comprend guère que des machines idéales. Son étude est néanmoins intéressante au point de vue théorique et peut conduire à d'utiles applications dans

la discussion des propriétés des machines des autres groupes.

Le second comprend les dynamos à courants sinusoïdaux et renferme toutes les machines à courants alternatifs.

Le troisième correspond aux courants ondulatoires résultant de la superposition de plusieurs courants sinusoïdaux redressés et dont les sinusoïdes sont affectées les unes par rapport aux autres de différences de phase. A ce groupe se rattachent les machines à courants dits continus, et par suite, toutes les nombreuses machines dont l'enroulement est du type Gramme ou d'un type analogue.

Au quatrième enfin, appartiennent les machines à plusieurs circuits traversés par des courants sinusoïdaux polyphasés. Ce groupe comprend toutes les machines à champs tournants.

Les *transformateurs électro-électriques* sont ceux qui portent plus particulièrement dans l'industrie le nom de transformateurs électriques. Ils servent d'appareils intermédiaires de transformation.

Ils comprennent deux groupes principaux :

Les *transformateurs rotatifs*, formés en général de l'accouplement de deux machines et permettant de transformer des courants d'une forme quelconque en courants d'une forme quelconque ;

Les *transformateurs d'induction* ou générateurs secondaires, transformant des courants alternatifs en courants alternatifs ou des courants polyphasés en courants de même nature.

Enfin les *transformateurs électro-calorifiques* transforment l'énergie électrique en radiations calorifiques ou lumineuses. Leur utilisation comme sources de

chaleur ou comme transformateurs d'énergie calorifique en énergie électrique n'a pas encore donné de résultats satisfaisants ; nous ne nous occuperons donc pas de ces applications particulières et nous considérerons seulement les appareils non réversibles qui permettent de produire la lumière électrique.

Nous étudierons séparément les propriétés de l'arc voltaïque, les divers foyers à arc et les lampes à incandescence. J'en profiterai pour vous donner quelques détails sur la question générale de l'éclairement et sur les diverses méthodes de photométrie.

Après cette revue complète des transformateurs d'énergie, nous nous occuperons de l'intermédiaire obligé entre les générateurs et les récepteurs, de la ligne.

Le problème de la distribution électrique est un des plus importants qu'ait à traiter l'ingénieur électricien. Suivant la nature et le prix de l'énergie à mettre en œuvre, suivant les nécessités de l'utilisation, suivant la position relative des lieux de production et de consommation, les conditions économiques varient : à la solution du problème se trouvent liés le choix de la nature du courant, du type des générateurs et des appareils d'utilisation, des dimensions et de la disposition des conducteurs.

Nous aurons donc d'abord à aborder très sommairement cette question complexe de la distribution, puis à donner quelques détails sur les conducteurs employés pour la canalisation électrique et sur les nombreux appareils accessoires qui complètent une installation industrielle : rhéostats, commutateurs, tableaux de distribution, interrupteurs, appareils de sécurité, régulateurs divers.

Un groupe d'appareils accessoires spéciaux méritera d'attirer plus particulièrement notre attention, je veux parler des compteurs d'électricité, dont l'usage se répand de plus en plus, dont les types différents sont très nombreux et qui constituent une classe d'appareils toujours fort ingénieux et souvent des plus intéressants.

Nous connaîtrons alors à peu près tous les appareils ou engins utilisés par l'industrie électrique et nous pourrons étudier plus spécialement quelques cas particuliers d'applications intéressantes ; par exemple les questions relatives au transport industriel de l'énergie, à la traction électrique sur routes ou sur chemins de fer, à la soudure électrique et à quelques autres utilisations de l'électricité.

Novembre 1892.

F. DE NERVILLE.

REGLEMENT

RELATIF AUX

INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES

DE LA

NATIONAL ELECTRIC LIGHT ASSOCIATION

ADOPTÉ

PAR LA CONVENTION DE MONTRÉAL (*)

Classe A. — Stations centrales.

Pour l'éclairage ou l'énergie.

Ces règles s'appliquent également aux chambres des dynamos dans les installations isolées, reliées aux bâtiments utilisés à d'autres usages ou séparées de ces bâtiments. Elles sont applicables à tous les genres d'appareils, à potentiel bas ou élevé.

Les générateurs ou moteurs doivent être : 1° établis dans une pièce sèche ; 2° isolés sur des planchers ou des bâtis, qui doivent être maintenus remplis pour prévenir l'absorption de l'humidité et être conservés propres et secs ; 3° non exposés à la poussière ou à des matières combustibles ; 4° revêtus chacun d'une couverture imperméable à l'eau lorsqu'ils ne sont pas en activité. Dans aucun cas, un générateur ne peut être établi dans des locaux où se pratiquent des opérations

(*) Traduction du *Bulletin de la Société belge d'électriciens.*

dangereuses, tels que les ateliers de coton, de jute, de lin, de laine ou les minoteries.

Entretien et surveillance. — Un homme compétent doit rester en permanence dans le local où fonctionnent les générateurs. Les torchons huileux doivent être placés dans des cruches de métal et enlevés chaque jour.

Conducteurs. — Depuis les générateurs, commutateurs (switchboards), rhéostats ou autres appareils jusqu'aux lignes extérieures, les conducteurs doivent être : 1° en pleine vue ; 2° entièrement sur des isolateurs incombustibles, tels que ceux de verre ou de porcelaine ; 3° écartés par des tubes isolants incombustibles du contact des parquets, cloisons ou murs, à travers lesquels ils passent ; 4° tenus éloignés les uns des autres d'une façon rigide pour qu'ils ne puissent entrer en contact ; 5° protégés par un isolant incombustible suffisant pour prévenir un contact accidentel ; 6° d'une section suffisante pour en prévenir l'échauffement (voir le tableau de capacité des fils) ; 7° reliés par des épissures ou joints d'une conductibilité égale à celle des conducteurs eux-mêmes, soudés si c'est nécessaire pour les rendre efficaces et permanents ; 8° s'ils se trouvent sous les planchers ou dans des tours de distribution, établis dans des endroits suffisamment spacieux pour permettre l'inspection et la ventilation et pourvus d'une enveloppe spéciale.

Les commutateurs (switchboards) doivent être : 1° placés de façon à empêcher qu'ils communiquent l'incendie aux matériaux combustibles qui les entourent ; accessibles de tous les côtés lorsque les connexions se trouvent sur la face postérieure ; ou placés contre un mur de briques ou de pierres, lorsque les connexions se trouvent entièrement sur la face anté-

rieure ; 2° préservés de l'humidité ; 3° construits en matériel incombustible ou de bois dur, injecté pour prévenir l'absorption de l'humidité ; 4° pourvus de barres et de fils conformément aux règles 1, 2, 4, 5, 6 et 7 relatives à la pose des fils intérieurs.

Les boîtes de résistance et régulateurs de courant (equalizers) doivent être : 1° pourvues d'enveloppes (frames) métalliques ou incombustibles ; 2° traitées comme des sources de chaleur ; 3° placées sur le switch ou à une distance d'un pied ($0^m,30$), de tout matériel combustible, ou séparées de ce matériel par de l'asbeste ou du ciment.

Les paratonnerres doivent être : 1° attachés de chaque côté de tout circuit aérien relié à la station ; 2° en pleine vue ; 3° sur la table de commutation ou dans un autre endroit aussi accessible, loin de tout matériel combustible ; 4° reliés à deux terres au moins au moyen de fils séparés, de grand diamètre ; 5° construits de façon à ne pas maintenir un arc lorsque la décharge a passé.

Vérifications. — Tous les circuits en série et alternatifs doivent être vérifiés toutes les deux heures, pendant le fonctionnement, pour découvrir toute perte à la terre, anormale au point de vue du potentiel et du mode d'opération. Tous les systèmes à arc multiple de bas potentiel (300 volts ou moins) doivent être pourvus d'un dispositif indicateur ou découvreur (detecting), qu'on puisse adapter aisément, donnant les moyens faciles de procéder à la vérification là où la station fonctionne en permanence.

Les résultats de toutes les vérifications doivent être conservés pour être examinés par les inspecteurs d'assurance.

Classe B. — Systèmes a arc (séries).

Conducteurs aériens. — Tous les conducteurs aériens extérieurs, y compris les fils de service, doivent être : 1° recouverts d'une matière isolante quelconque difficilement enlevable ; 2° attachés solidement à des supports convenablement isolés et bien construits, tous les fils ayant un isolement égal à celui des conducteurs auxquels ils confinent ; 3° être établis de manière que l'humidité ne puisse former un contact avec aucune substance autre que leurs propres supports isolants ; 4° à sept pieds au moins au-dessus du point le plus élevé des toits plats et à au moins un pied au-dessus du faîte des toits en pente, au-dessus desquels ils passent ou auxquels ils sont attachés ; 5° protégés, quand c'est nécessaire, en vue des accidents possibles aux conducteurs ou aux supports, de tout contact éventuel avec d'autres fils conducteurs ou d'objets dans lesquels le courant peut se perdre, et ce, au moyen de fers ou de fils de garde isolés. Des précautions semblables doivent être prises dans les endroits où se présentent des angles aigus ou quand les fils peuvent éventuellement venir en contact avec des fils d'éclairage ou d'énergie ; 6° pourvus d'isolateurs, forme cloche, de verre ou de porcelaine. Les roulettes (knobs) de porcelaine et les crochets de caoutchouc sont interdits ; 7° épissés ou joints de façon à être sûrs mécaniquement et électriquement sans soudure. Ils doivent ensuite être soudés pour assurer le maintien et recouverts d'un isolant égal à celui des conducteurs.

La formule suivante pour le flux à souder est approuvée : solution saturée de zinc, cinq parties ;

alcool, quatre parties ; glycérine, une partie. Les conducteurs ne pourront être superposés ou attachés à des bâtiments autres que ceux où l'on utilise la lumière ou l'énergie, si ce n'est sur des poteaux séparés ou des constructions, qu'on puisse aisément vérifier.

Les blocs de service doivent être couverts sur toute leur surface d'au moins deux couches de peinture imperméable à l'eau et maintenues dans cet état. Les fils télégraphiques, téléphoniques et autres ne doivent pas être placés sur la même traverse que les fils à lumière ou à énergie et ne peuvent être placés sur la même construction ou sur le même poteau.

Conducteurs intérieurs.

Tous les *conducteurs intérieurs* doivent être : 1° lorsqu'ils entrent dans les bâtiments, depuis les isolateurs terminaux extérieurs, jusqu'aux murs et à travers ceux-ci, couverts d'un isolant imperméable à l'eau et doivent être pourvus de gouttières à l'extérieur, de préférence allant obliquement vers l'intérieur, et pourvues d'un tube isolant imperméable à l'eau et non combustible ; 2° disposés de manière à entrer dans le bâtiment et à le quitter en passant par un commutateur de service à double contact qui fermera complètement le circuit principal et disjoindra les fils intérieurs lorsque le switch est tourné « off ». Le switch doit être construit de façon à être automatique dans son action, ne s'arrêtant pas entre les pointes lorsqu'il est manœuvré et de manière à prévenir un arc entre les pointes en toutes circonstances ; il doit indiquer à première vue si le courant est fourni ou rompu et doit être monté sur une base incombustible dans une position où il puisse être préservé de l'humidité et d'un accès

facile aux agents de la police et aux pompiers ; 3° toujours en pleine vue, jamais couverts, excepté dans des cas spéciaux où un tube protecteur peut être nécessaire ; 4° recouverts dans tous les cas d'une matière incombustible et imperméable qui adhère au fil, ne s'éraillant pas par le frottement et supportant une température de 150° Fahrenheit (68° C) sans se ramollir ; 5° dans des locaux secs ; tenus rigidement éloignés les uns des autres d'au moins dix pouces (0m,25) excepté lorsqu'ils sont recouverts (outre l'isolant) d'un tube imperméable à l'eau, incombustible et non conducteur, qui doit être assez solide pour protéger l'enveloppe isolante contre toute dégradation. Les conducteurs établis de cette façon ne peuvent se trouver à moins de trois pouces (0m,076) les uns des autres ; ils doivent être fixés par des crampons sous lesquels sont placées des bandes ou des selles isolantes mécaniquement rigides, d'une plus grande largeur que le métal du crampon, de façon à prévenir toute détérioration du tube ; 6° dans les locaux humides, attachés à des isolateurs de verre ou de porcelaine et séparés de 10 pouces (0m,25) ou plus ; 7° lorsqu'ils traversent des murs, planchers, poutres ou cloisons, traités comme dans les stations centrales dans les mêmes conditions.

Lampes et autres dispositifs.

Les lampes à arc doivent, dans tous les cas, être : 1° soigneusement isolées de toute matière inflammable ; 2° pourvues en tout temps d'un globe de verre entourant l'arc, fixé solidement sur une base close : on ne peut employer des globes brisés ou fêlés ; 3° pourvues d'un commutateur à main et aussi d'un commutateur automatique, qui dérive le courant autour des charbons

lorsqu'ils cessent d'être alimentés convenablement ; 4° pourvues d'arrêts sûrs, en vue de prévenir la chute des charbons dans le cas où les pinces se détachent ; 5° soigneusement isolées du circuit dans toutes leurs parties exposées ; 6° lorsqu'une matière inflammable se trouve près ou au-dessous de la lampe, pourvues d'un grillage de fil métallique enserrant le globe et d'un garde-étincelles au-dessus pour prévenir la projection d'étincelles, de cuivre fondu ou de charbon. Les lampes à incandescence dans les circuits en séries, ayant un potentiel maximum de 350 volts ou davantage, doivent être soumises aux mêmes règles que les lampes à arc et chaque lampe munie d'un commutateur à main et d'un coupe-circuit automatique, lorsque les lampes sont en séries multiples, ces commutateurs et coupe-circuits ne peuvent contrôler moins d'un simple groupe de lampes. Les dispositifs électro-magnétiques pour les commutateurs ne sont pas admis. En aucun cas, les lampes à incandescence sur des circuits en série, ne pourront être attachées aux appareils à gaz.

(*A suivre.*)

NOTE SUR LA GUTTA-PERCHA

I.

J'ai trouvé, il y a quelque temps, au dépôt central des télégraphes, environ 100 mètres de câble télégraphique à cinq fils sous guipage, destiné aux lignes télégraphiques dans tuyaux en fonte.

Chaque conducteur en cuivre était formé de quatre brins de $0^{mm},6$ cordés ensemble ; il était recouvert de deux couches de gutta-percha ayant un diamètre total de 5 millimètres. Cette spécification indiquait que la fabrication de ce câble remontait à 1867 ou au delà, et bien qu'aucune précaution n'eût été prise pour sa conservation, la gutta-percha qui en constituait le diélectrique était en parfait état, aussi élastique, aussi souple qu'au moment où le câble venait d'être fabriqué ; c'est pourquoi il m'a paru intéressant d'étudier cette gutta-percha.

L'analyse que j'en ai fait faire a montré que sa composition était la suivante :

Eau	1,20 p. 100
Impuretés	0,60 —
Résines	24,40 —
Gutta pure	73,80 —
Total	100,00 p. 100

Les deux résines ayant été séparées l'une de l'autre, on a trouvé qu'il y avait :

Albane	7,20 p. 100
Fluaville	17,20 —
Total	24,40 p. 100

Les mesures électriques, faites à ce moment sur ce câble immergé dans de l'eau à la température de 24°, ont donné :

Capacité kilométrique	$0^{\varphi},18$
Isolement kilométrique.	475^{Ω}

Une âme de câble sous-marin a d'habitude un toron de cuivre de $2^{mm},2$ de diamètre et avec le diélectrique qui le recouvre, son diamètre est égal à $7^{mm},1$. En supposant qu'une telle âme soit formée avec cette gutta-percha, elle aurait, à 24° :

Capacité kilométrique.	$0^{\varphi},21$
Isolement kilométrique	390^{Ω}

nombres qui se rapprochent de ceux trouvés pour les premiers câbles sous-marins. Avec les guttas actuelles, on trouve pour ces âmes des isolements kilométriques variant de 2.000^{Ω} à 1.000.

II.

Dernièrement, ayant à vérifier de nouveau l'état électrique d'un câble armé pour lignes souterraines (âme modèle M), fabriqué vers 1884, j'ai constaté, en des points nombreux de la surface du diélectrique, l'existence d'une matière blanche, ce qui m'a porté à étudier cette gutta-percha. Son analyse a donné la composition suivante :

Eau	1,00 p. 100
Impuretés	0,80 —
Résines	41,80 —
Gutta pure.	56,40 —
Total.	100,00 p. 100

La séparation des deux résines l'une de l'autre a montré qu'il y avait :

Albane	37,80 p. 100
Fluaville	4,00 —
Total	41,80 p. 100

Cette gutta contient beaucoup moins de gutta pure que celle de 1867 et surtout beaucoup plus d'albane ; celle-ci s'est même séparée du reste en certains points et s'est déposée sous forme de matière blanche à la surface du diélectrique. A part cela, son aspect n'est pas mauvais, mais il est probable que si elle n'avait pas été garantie contre l'action de l'air et de la lumière par les spires jointives de l'armature, elle se serait moins bien conservée.

Les mesures électriques ont donné pour ce câble, placé dans l'eau à 10°, un isolement kilométrique de 15.265$^{\Omega}$.

A 24° cet isolement serait égal à 2.074$^{\Omega}$.

Le calcul montre qu'une âme de câble sous-marin, ayant les dimensions indiquées précédemment et dont le diélectrique serait de la gutta identique à celle de ce câble armé, aurait à 24° un isolement électrique égal à 2.335$^{\Omega}$.

Ainsi la gutta-percha de 1867, dont la conservation est parfaite et les propriétés isolantes relativement faibles contient beaucoup plus de gutta pure que celle de 1884 ; elle contient moins de résines et surtout beaucoup moins d'albane que cette dernière. Celle-ci, par contre isole beaucoup plus.

Ces faits justifient une fois de plus les conclusions de mes précédents articles sur cette matière.

LAGARDE.

CHRONIQUE.

Description d'un fourneau électrique.

Par M. Henri MOISSAN.

La découverte du chalumeau à oxygène, par Henri Sainte-Claire Deville et Debray, a rendu de grands services à la chimie. Non seulement, au moyen de cet appareil, il a été facile de fondre et d'affiner le platine, d'obtenir des alliages nouveaux, mais on a pu aussi étendre et généraliser un certain nombre de questions de la chimie minérale.

La température que l'on peut atteindre avec cet appareil, alimenté par le gaz d'éclairage et l'oxygène, est d'environ 2.000 degrés. On sait que Deville et Debray n'ont pu trouver que la chaux vive pour résister à cette température élevée.

Ayant eu besoin, dans des recherches antérieures, de soumettre différents corps à une température supérieure à 2.000 degrés, j'ai songé à utiliser la chaleur fournie par l'arc électrique. Après quelques essais, je me suis arrêté enfin à un dispositif que je présente à l'Académie et qui n'a pour lui que son extrême simplicité.

Ce nouveau four est formé par deux briques bien dressées, de chaux vive, appliquées l'une sur l'autre; la chaux peut être remplacée par deux briques de magnésie calcinée bien exempte de sels fusibles et préparée dans les conditions indiquées par M. Schlœsing. Nous avons aussi essayé de construire le même appareil en charbon de cornue; mais, dans ce dernier cas, la perte de chaleur par conductibilité est trop grande pour que l'on puisse atteindre une température très élevée. La brique inférieure porte une rainure longitudinale qui recevra les deux électrodes, et au milieu se trouve une petite cavité servant de creuset. Cette cavité peut être plus ou moins profonde et contient une couche de quelques centimètres de la substance sur laquelle doit porter l'action calorifique de l'arc. On peut aussi installer un petit creuset de charbon renfermant la matière qui doit être calcinée. Enfin, quand il s'agit de réduction d'oxydes, puis de fusion des métaux, on

utilise des creusets plus grands, et une ouverture cylindrique, ménagée au milieu de la brique supérieure, permet de laisser tomber de temps en temps dans le four de petites gargousses formées par le mélange comprimé d'oxyde et de charbon.

Ce four est donc à un seul arc, et le diamètre des charbons qui servent de conducteurs variera naturellement avec l'intensité du courant. Après chaque expérience, l'extrémité des charbons est entièrement transformée en graphite.

Dans nos premières recherches, nous avons employé une petite machine Edison, actionnée par une machine à gaz de 4 chevaux. Le plus souvent, le courant qui traverse le four indiquait 30 ampères et 55 volts. La température obtenue ne dépassait pas beaucoup 2.250°. Dans une deuxième série d'expériences, nous avons utilisé la puissance produite par une machine à gaz de 8 chevaux. Les appareils de mesure nous indiquaient 100 ampères et 45 volts. La température atteinte était d'environ 2.500°. Enfin, grâce à l'obligeance de M. Violle, nous avons pu entreprendre une troisième série d'expériences au Conservatoire des Arts et Métiers. Nous avions à notre disposition une puissance de 50 chevaux, et l'arc obtenu dans ces conditions mesurait jusqu'à 450 ampères et 70 volts. La température était d'environ 3.000°. Nous tenons beaucoup à adresser tous nos remerciements à M. Tresca, dont le bienveillant concours nous a été très utile dans cette dernière série d'expériences.

Lorsqu'on emploie des courants à haute tension, il est très utile de prendre certaines précautions et d'isoler avec soin les conducteurs. D'ailleurs, même avec des courants de 30 ampères et 50 volts, tels que ceux employés au début de cette étude, il est indispensable de ne pas exposer le visage à une action prolongée de la lumière électrique et de toujours garantir les yeux avec des lunettes à verres très foncés. Les coups de soleil électriques ont été très fréquents au début de ces recherches, et l'irritation produite par l'arc sur les yeux peut amener des congestions très douloureuses.

Les températures obtenues dans ces séries d'expériences ne sont qu'approchées. Mais M. Violle, non content de nous fournir les moyens de poursuivre ce travail, a bien voulu se charger spécialement de la détermination de ces différentes

températures par des procédés qu'il présentera bientôt à l'Académie.

Lorsque nous avons eu l'habitude de manier ce four électrique, nous avons pu produire un certain nombre de réactions nouvelles que nous allons résumer à grands traits.

Dès que la température est voisine à 2.500°, la chaux, la strontiane, la magnésie cristallisent en quelques minutes. Si la température atteint 3.000°, la matière même du four, la chaux vive, fond et coule comme de l'eau. A cette même température, le charbon réduit avec rapidité l'oxyde de calcium et le métal se dégage en abondance ; il s'unit avec facilité aux charbons des électrodes pour former un carbure de calcium, liquide au rouge, qu'il est facile de recueillir. Le sesquioxyde de chrome, l'oxyde magnétique de fer sont fondus rapidement à la température de 2.250°. Le sesquioxyde d'uranium, chauffé seul, est ramené à l'état de protoxyde noir cristallisé en longs prismes. L'oxyde d'uranium, qui est irréductible par le charbon aux plus hautes températures de nos fourneaux, est réduit de suite à la température de 3.000°. En dix minutes, il est facile d'obtenir un culot de 120 grammes d'uranium.

Les oxydes de nickel, de cobalt, de manganèse, de chrome sont réduits par le charbon, en quelques instants, à 2.500°. C'est une véritable expérience de cours, n'exigeant que dix ou quinze minutes.

Cette méthode nous a permis de faire réagir avec facilité le bore et le silicium sur les métaux et d'obtenir des borures et des siliciures en très beaux cristaux. Enfin il est facile, dans les conditions où nous nous sommes placés, de faire agir cette température élevée sur un grand nombre de corps simples ou composés. Nous continuons cette étude, et nous communiquerons bientôt à l'Académie les résultats de nos nouvelles recherches.

(*Comptes rendus*, 12 décembre 1892).

Nécrologie.

M. Boussac.

L'administration française des Postes et des Télégraphes vient d'être douloureusement éprouvée par la perte d'un de ses plus distingués fonctionnaires. M. l'inspecteur général Boussac est décédé à Layrac (Lot-et-Garonne), le 14 janvier dernier, enlevé par une maladie qui le tenait depuis quelque temps éloigné de son service.

Né à Layrac, le 24 novembre 1829, M. Boussac (Joseph-Auguste-Charles), était admis, à l'âge de vingt ans, à l'École polytechnique, après de solides et brillantes études au lycée de Toulouse. Classé à sa sortie de l'école, en 1851, dans le service des télégraphes, il était nommé élève inspecteur, et, après quelques mois seulement de séjour à Paris, il était envoyé en Algérie. La télégraphie électrique était encore peu développée dans notre grande colonie africaine, et jusqu'en 1855, Boussac occupa dans plusieurs résidences, Aumale, Mostaganem, Blidah, Constantine, diverses situations comportant à la fois le service électrique à ses débuts, et le service aérien. L'intelligente activité dont il fit preuve le désigna tout spécialement au choix de l'administration pour la direction des grands travaux de construction des lignes électriques. C'est ainsi que de 1855 à 1857, il construit 300 kilomètres de ligne, de Constantine à Sétif, et de là à la limite de la province. Au commencement de 1857, il dirige les travaux d'établissement de la ligne de Sétif à Bougie (140 kilomètres). Notre réseau colonial lui est ainsi redevable de plus de 400 kilomètres de lignes, établies dans les conditions les plus pénibles, pendant les opérations des colonnes expéditionnaires de la grande Kabylie, et au prix de fatigues supportées avec cet entrain caractéristique qui était le fond de la nature de notre ami regretté.

Rappelé en France au début de 1857, Boussac fut successivement directeur de station à Limoges, inspecteur à Agen, et en juillet 1861, il fut chargé des fonctions de chef de service du département du Gers, où il est resté jusqu'en mars 1868. —

Pendant cette période, tout en lui laissant ses fonctions, on fit souvent appel à son activité pour diriger la construction de nombreuses lignes, telles que le réseau côtier sur le littoral de la Méditerranée, de Perpignan à Antibes, les lignes de Périgueux à Brives, à Figeac et à Agen, au total 640 kilomètres.

Envoyé de nouveau en Algérie au commencement de 1868, avec le grade d'inspecteur, il fut chargé de l'inspection de la province d'Alger, et remplit les fonctions d'adjoint à l'inspecteur divisionnaire chef du service de la colonie. — Lors des événements de 1870-1871, il dut prendre la direction complète des services de l'Algérie, et dans ces circonstances particulièrement difficiles, il sut faire preuve d'une initiative et d'un dévouement au-dessus de tout éloge.

Rentré en France, en août 1871, il est d'abord inspecteur à Toulouse, puis chef de bureau à l'administration centrale (1875), chef de l'exploitation télégraphique après la fusion (1878), inspecteur général du contrôle (1881) et enfin inspecteur général chargé de la troisième circonscription depuis le 1er août 1890.

Boussac avait été nommé chevalier de la Légion d'honneur, pendant son second séjour en Algérie, en 1869, et promu en 1881 au grade d'officier de l'Ordre national. Ces hautes distinctions n'étaient que la juste récompense d'une carrière administrative si dignement remplie.

Les travaux absorbants de sa vie de fonctionnaire n'empêchaient cependant pas Boussac de rester fidèle à son goût pour les études scientifiques. Dès son séjour à Auch, il préparait un ouvrage élementaire de géométrie, de physique et de chimie. Il avait eu tout d'abord la pensée d'utiliser ce travail pour l'instruction de ses fils; mais, constamment préoccupé de l'avenir de notre administration, il comprit que cet ouvrage pourrait avoir une portée pratique pour l'instruction du personnel s'il le développait en l'appliquant plus spécialement à la télégraphie. C'est ainsi qu'il a été amené à publier son *Précis de télégraphie*, qui est promptement devenu un livre classique.

Travailleur infatigable, Boussac savait d'ailleurs se tenir au courant des progrès incessants de la science, et il prit une part active aux travaux du Congrès des électriciens réunis à Paris, à l'occasion de l'Exposition de 1881.

La grande compétence qu'il avait acquise dans la construc-

tion des lignes électriques l'a naturellement désigné au choix du ministre, au moment de la création de l'École supérieure de télégraphie. Il fut chargé du cours de construction dès 1879, et ce n'est que tout récemment, contraint par la maladie, qu'il a cessé de remplir cette charge, à laquelle il s'était dévoué de tout cœur. Les nombreux élèves qu'il a formés ne peuvent oublier la clarté de son enseignement, la précision de sa méthode, la cordialité et la malicieuse bonhomie de sa parole. Dans ces derniers temps, il préparait la publication de son cours. La mort ne lui a pas permis d'achever son œuvre; mais celle-ci sera poursuivie dans l'esprit même de l'auteur, et les futures promotions d'élèves y retrouveront cet enseignement si justement apprécié par leurs devanciers.

Boussac n'était pas seulement un fonctionnaire éminent et un homme de science, c'était aussi un homme de cœur.

On ne pouvait le connaître sans l'aimer, sans apprécier sa bienveillance inaltérable et la chaleur communicative de son caractère. Aussi, sa mort cause-t-elle d'unanimes regrets. Ceux qui ont eu, comme nous, le bonheur de le fréquenter dans l'intimité, peuvent dire quels trésors de dévouement et d'affection il prodiguait à sa famille et à ses amis!

Boussac laisse à tous le bel exemple d'une vie entièrement consacrée au bonheur des siens, à l'accomplissement de ses devoirs et au service du pays. E. Lorin.

Les obsèques de M. Boussac ont été célébrées à Layrac, le 16 janvier 1893, au milieu d'une nombreuse assistance de parents, d'amis, d'habitants de la localité et de fonctionnaires. — L'administration y était représentée par M. Caël, inspecteur général délégué par M. de Selves, MM. Berthelin et Wunschendorff, inspecteurs adjoints à l'inspection générale, M. Vasseur, chef de bureau, les directeurs des départements de Lot-et-Garonne et du Gers, et une délégation d'agents. En quelques paroles émues prononcées sur la tombe, M. Caël a retracé la carrière de son regretté collègue, et a adressé à ce fonctionnaire d'élite un suprême et dernier adieu.

L'Éd.-Gérant Dunod. — Paris. — Imp. C. Marpon et E. Flammarion, rue Racine, 26.

ANNALES

TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1893 Mars-Avril

NOUVEAUX MÉTAUX

POUR

LES ÉTALONS DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

Pendant longtemps, le maillechort a été presque exclusivement employé pour la construction des caisses de résistance, en raison de sa résistance spécifique très élevée, et de son coefficient de variation relativement bas. Mais, lorsque la précision des recherches augmentant, surtout lorsque, par un emploi plus général des étalons mercuriels, on put constater des variations très sensibles des étalons en maillechort, on reconnut la nécessité d'avoir recours à des métaux plus stables. Dans les mesures de moyenne précision, il est encore nécessaire de déterminer la température des bobines et, pour les expériences très précises, on n'arrive qu'à grand'peine à l'exactitude qu'il est nécessaire d'atteindre dans cette détermination.

C'est en Allemagne surtout, et grâce en partie à l'impulsion donnée par l'Institut physico-technique impérial, que la recherche de nouveaux métaux pour résistances électriques a été activement poussée; les résultats de ce travail, auquel ont coopéré MM. Feussner,

Lindeck, Kahle pour la partie physique, Mylius, Förster, Fromm pour l'analyse chimique, ainsi que la Isabellenhütte près Dillenburg et la maison Basse et Selve à Altena, sont dès maintenant fort intéressants, et méritent la plus grande attention de la part de nos constructeurs. On est parvenu à composer des alliages très ductiles qui paraissent à peu près invariables avec le temps, et dont la variation avec la température est si faible que la mesure de cette dernière pour la connaissance de la résistance est devenue à peu près superflue.

Deux séries de métaux ont été surtout étudiées; ce sont, d'une part des alliages composés presque exclusivement de nickel et de cuivre, avec des traces de manganèse qui permettent le tréfilage; d'autre part, des alliages de cuivre et manganèse avec des proportions jusqu'ici inusitées de ce dernier métal; on ajoute à certains de ces alliages une petite quantité de nickel. Parmi les premiers, ceux qui remplissent le mieux les conditions de permanence physique et chimique ont malheureusement, en contact avec le cuivre, un pouvoir thermo-électrique élevé. Les alliages Cu Mn ont le défaut de s'oxyder fortement à l'air; mais, si l'on a soin de les couvrir de gomme-laque, l'oxydation est, paraît-il, complètement empêchée. Ces derniers présentent une particularité inattendue; tandis que les alliages à faible teneur en manganèse varient à peu près linéairement avec la température, aussitôt qu'on dépasse une certaine limite, la variation est représentée par une ligne à forte courbure; la résistance augmente d'abord, passe entre 30° et 50° par un maximum, puis décroît de nouveau. Pour ces alliages, le coefficient de variation à 0° est positif et inférieur à 0,00005. La résistance spécifique augmente proportionnellement à la

teneur en manganèse. Avec 30 p. 100 de ce dernier métal, on atteint la valeur énorme de 107 microhms-centimètres.

Voici, du reste, les constantes des alliages étudiés :

Première série.

DÉSIGNATION de l'alliage	COMPOSITION CHIMIQUE				PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES	
	Ni	Cu	Mn	Fe	Résistance spécifique en microhms-centimètres	Variation pour 1 degré
	»	100,0	»	»	2,2	+ 0,00378
A	10,0	89,9	traces	0,1	15,0	0,00050
B	16,0	84,0	traces	0,2	21,5	0,00030
C	20,0	79,8	traces	0,1	26,5	0,00027
P — N	24,1	74,9	0,7	0,6	31,0	0,00025
D	29,9	69,7	0,4	0,4	38,5	0,00018
E	41,2	58,6	0,7	0,4	50,0	—0,00004
F	46,2	54,0	0,5	0,3	52,0	—0,00005
G	49,4	49,8	0,3	0,5	51,5	+ 0,00004
J	56,4	44,0	traces	0,3	52,0	0,00001
K	62,0	38,4	traces	0,3	51,3	0,00020
L	89,5	7,9	1,4	1,2	20,0	0,00285
M	93,7	3,9	1,4	1,0	18,0	0,00284
	100,0	»	»	»	13,0	0,00405

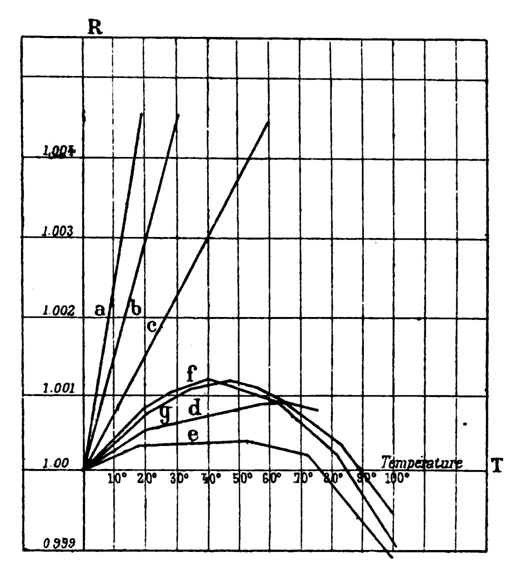
Deuxième série.

DÉSIGNATION de l'alliage	COMPOSITION CHIMIQUE				PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES	
	Mn	Cu	Fe	Si	Résistance spécifique	Variation pour 1 degré
a	3,5	96,5	traces	traces	14,0	0,00022
b	4,2	95,7	traces	traces	17,3	0,00020
c	6,3	93,6	traces	traces	24,2	0,00005
d	7,9	92,0	traces	traces	28,8	0,00003
e	12,3	87,4	traces	0,2	43,0	»
f	24,9	74,9	0,3	traces	83,2	»
g	30,0	68,6	1,3	0,1	107,3	»

Ce dernier tableau doit être complété par le diagramme suivant qui reproduit la variation thermique de ces divers alliages.

En ajoutant du nickel aux alliages Cu Mn, on les rend plus inattaquables et plus stables avec le temps ; le

principal d'entre eux est la manganine (84 Cu 4 Ni 12 Mn), dont les propriétés ne diffèrent pas essentiellement de celles de l'alliage *e* ci-dessus.



Dans le premier tableau, l'alliage P.-N. est le Patent-Nickel, fabriqué depuis quelques années par la maison Basse et Selve. A la suite des recherches dont nous venons de parler, cette maison a entrepris aussi le tréfilage d'un nouvel alliage, le *Constantan*, compris entre les combinaisons D et E des essais, et dont le seul défaut paraît être son pouvoir thermo-électrique qui, avec le cuivre, est de 40 μv par degré.

L'étude de ces nouveaux métaux se poursuit encore et l'on trouvera peut-être des alliages encore plus avantageux; mais dès maintenant, on peut affirmer qu'il y a tout lieu d'abandonner le maillechort.

Ch.-Ed. GUILLAUME.

PROJET DE RELAIS DIFFÉRENTIEL

DE M. Edward RAYMOND BARKER

M. Edward-Raymond Barker s'est proposé d'obtenir automatiquement la retransmission, sur un câble sous-marin, de signaux reçus d'un autre câble.

Ses recherches datent seulement du mois de juin dernier, mais les résultats obtenus font bien augurer de la réussite de ces expériences.

Elles ont eu, comme M. Barker se plait d'ailleurs à le reconnaître, pour point de départ les idées appliquées par M. Cuttriss dans son dernier relais.

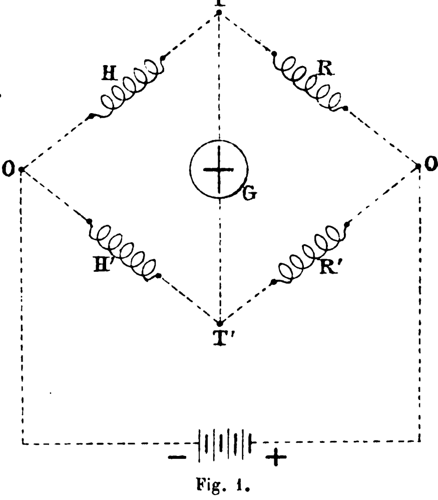


Fig. 1.

Si l'on intercale un galvanomètre G entre les sommets T T′ d'un pont de Wheatstone constitué par quatre résistances H, H′, R, R′ et dont les têtes O O′ sont en communica-

tion avec les pôles d'une pile locale, aucun courant ne passe dans le galvanomètre, entre T et T', tant que les quatre branches sont dans le rapport

$$\frac{H}{H'} = \frac{R}{R'}.$$

Dès que cette proportion n'existe plus, un courant passe dans le sens de T T' — ou de T' T, selon le cas — avec une force qui varie suivant le rapport des résistances.

Cette force est d'autant plus grande que la diminution de H, par exemple, coïncide avec une plus grande diminution de R' et une plus grande augmentation de H' et de R.

Or, si l'on peut, par un moyen quelconque, obtenir que les résistances H, R' soient diminuées, et les résistances H', R augmentées — ou inversement — par un effet mécanique de l'organe récepteur actionné par le courant du poste correspondant, le galvanomètre suivra tous les mouvements indiqués par cet organe, et avec des amplitudes de déviation proportionnelles à la force des signaux reçus.

En substituant au galvanomètre un appareil convenablement approprié, on pourra soit reproduire en local les signaux reçus d'une ligne A, soit les retransmettre sur une seconde ligne B.

Le relais de M. Cuttriss est basé sur ce principe.

Les résistances H, H', R, R' sont des spires en filaments de charbon que compriment ou détendent des tiges rigides solidaires de la bobine de réception mobile entre deux aimants. Des rhéostats sont intercalés dans chacune des branches pour les graduer : mais il y a intérêt à donner aux divers rhéostats le moins de

résistance possible, pour ne pas diminuer l'intensité du courant local.

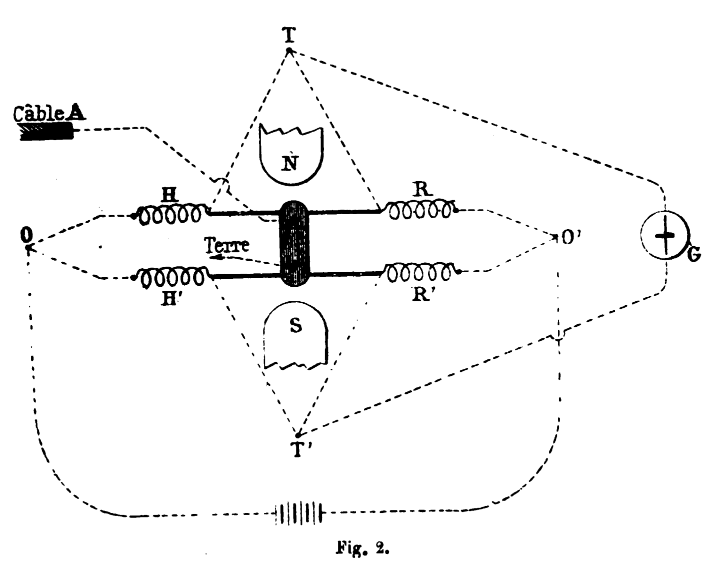


Fig. 2.

Si, au lieu d'intercaler un galvanomètre ou une bobine d'appareil entre les branches, on met l'un des sommets T', par exemple, en communication avec la terre, et l'autre T en communication avec une ligne B, tant que la condition d'équilibre

$$H = R,$$
$$H' = R',$$

sera remplie, il ne passera aucun courant dans la ligne B placée ainsi à égale distance de chacun des pôles de la pile.

Mais si l'on rompt l'équilibre, un courant — positif ou négatif, suivant le sens de la rupture et de force proportionnelle à la variation du rapport des résistances — circulera sur la ligne B. Le courant sera négatif,

par exemple, si H et R′ augmentent pendant que H′ et R diminuent — et d'autant plus fort que l'augmentation des deux premiers et la diminution des deux seconds sera plus considérable.

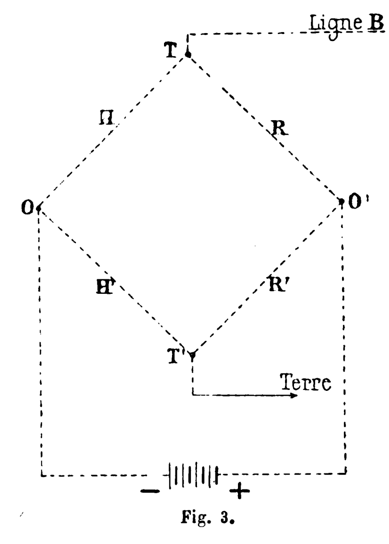


Fig. 3.

Donc, si l'on peut, par un moyen quelconque, comme précédemment, faire opérer cette augmentation et cette diminution par une action mécanique de l'organe récepteur intercalé à l'arrivée d'une ligne A, tous les signaux reçus par cet organe seront retransmis sur la ligne B, dans le sens et avec une force proportionnelle à la force des signaux reçus de la ligne A.

C'est ce principe que M. Edward-Raymond Barker a appliqué dans son système de translation automatique entre un câble A et un câble B.

Il a remplacé les spires de charbon par des résistances liquides.

Deux petites auges en arc de cercle, remplies de liquide, représentent l'une la somme des résistances H + R, l'autre celle des résistances H′ + R′.

Dans chacune des auges plonge une petite pointe en métal non oxydable, formant curseur, fixée à l'une des extrémités d'une aiguille métallique, A A′ solidaire de la bobine de réception et oscillant avec elle. Cette aiguille est divisée en deux parties, électriquement iso-

lées l'une de l'autre et c'est par ces deux parties que sont établies les communications du curseur T avec la ligne B, du curseur T′ avec la terre.

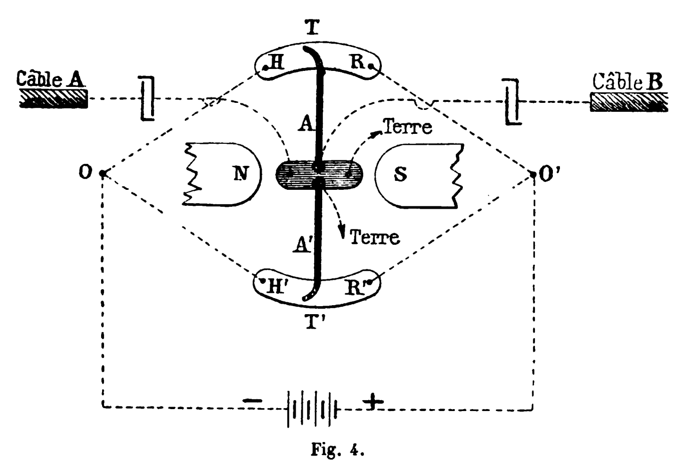


Fig. 4.

Les mouvements de l'aiguille portent, par conséquent, les curseurs l'un à droite, l'autre à gauche — ou inversement.

Dans la position de repos de la bobine et de l'aiguille qui fait corps avec elle, les curseurs sont au milieu des auges :

$$H = R \quad \text{et} \quad H' = R'.$$

Si l'aiguille s'incline de gauche à droite, T se dirige vers O′ et T′ vers O — R et H′ diminuent, H et R′ augmentent et un courant positif passe de O′ en R, en T, dans la partie A de l'aiguille et de là au câble B.

Pour le mouvement inverse, T se dirige vers O, T′ vers O′, H et R′ diminuent, R et H′ augmentent et c'est un courant négatif qui passe de O par H, T, A dans le câble B.

Les mouvements de l'aiguille étant ceux-mêmes qu'a

faits la bobine, les courants renvoyés sur le câble B sont exactement, comme sens et comme proportion relative de force, la reproduction de ceux qui ont actionné la bobine.

Quant à la force elle-même, elle dépend de l'énergie de la pile employée.

On peut, pour faciliter le réglage, ajouter des résistances artificielles à chacun des segments de liquide : mais ce n'est pas indispensable, car la position des auges elles-mêmes peut être modifiée, ainsi que la quantité de liquide. Une disposition particulière permet d'ailleurs de parer aux effets de l'évaporation.

L'auteur avait craint d'abord d'être gêné par l'électrolyse : mais les essais ont prouvé que les difficultés dues à cette cause n'étaient pas insurmontables.

Le relais translateur peut être séparé de l'organe de réception : dans ce cas la bobine de celui-ci agit sur l'aiguille au moyen de fils de cocon.

La *fig.* 5 donne le spécimen de la réception, sur un siphon recorder de signaux retransmis, au moyen du relais translateur à résistances liquides, à travers un câble artificiel de 3.200 ω et 426,4 microf. (équivalent à 1.421 milles nautiques de câble du type de 2,25 ω et 0,3 microf. par mille), isolé aux deux bouts sur un condenseur de 80 microf., la force de la pile locale employée étant de 50 volts.

S i l v e r t o w n

Fig. 5.

Les signaux étaient d'ailleurs encore bons quand on portait la ligne de 1.421 à 1.700 milles.

Dans une autre expérience, sous l'impulsion très faible du courant reçu d'un câble A, le relais différentiel a fait fonctionner un relais Brown Allen. La languette de ce dernier était munie d'un contact de chaque côté et mettait en mouvement, au moyen d'une pile locale, deux parleurs qui envoyaient, comme un manipulateur ordinaire, sur un câble B, les courants positifs ou négatifs d'une pile de ligne.

Une disposition avantageuse consisterait à combiner, dans certains cas, le siphon avec le relais différentiel à résistances liquides. La bobine mobile donnerait, en local, l'impression du signal sur la bande du siphon et le retransmettrait sur la seconde ligne au moyen du relais différentiel.

L'auteur espère pouvoir donner prochainement le résultat de ses nouvelles expériences et indiquer la forme définitive des instruments pour lesquels il a obtenu une protection provisoire.

GRAMACCINI.

STATIONS TÉLÉPHONIQUES AUTOMATIQUES (*)

X

Les systèmes d'installation de postes téléphoniques en embrochage réalisés pratiquement sont, nous l'avons dit, assez peu nombreux.

L'un des plus anciens et des plus connus est celui qu'a employé en Amérique la *Stabler Individual Telephone Call C°*.

Nous en indiquerons uniquement le principe, l'appareil ayant été déjà plusieurs fois décrit.

Chaque poste est muni d'un mouvement d'horlogerie qui fait avancer un frotteur sur un cercle. Il n'est relié à la ligne que pour une position déterminée de ce frotteur sur le cercle. Pour tout autre position, il en est isolé.

Du bureau central on peut, à l'aide d'un manipulateur, faire avancer simultanément et par impulsions successives les frotteurs de tous les appareils.

Les positions des frotteurs pour lesquelles chacun des postes est relié à la ligne, sont différentes, si on les rapporte à une origine commune.

Jamais deux postes ne pourront donc se trouver simultanément rattachés à la ligne, et l'on voit aussi que deux abonnés desservis par un même fil ne peuvent causer entre eux.

(*) Voir *Annales télégraphiques*, 1891, p. 421.

La *fig.* 43 représente les communications théoriques d'un poste. Le frotteur est indiqué en Z, l'anneau métallique sur lequel il se déplace, en V. Le frot-

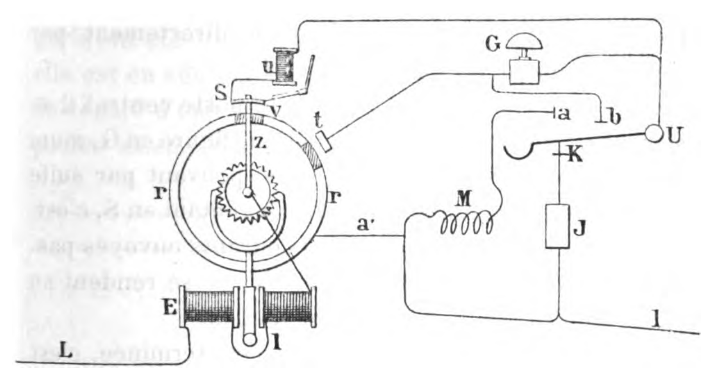


Fig. 43.

teur est fixé sur une roue dentée que les oscillations d'une ancre commandée par l'armature d'un électro-aimant E font avancer à chaque envoi de courants alternatifs effectués par le bureau central. Cette armature est mobile autour de l'axe I. S'il n'y a pas de raté, tous les frotteurs avancent synchroniquement.

Au point de vue électrique, un poste d'abonné peut occuper trois positions :

1° Le frotteur est appuyé sur le contact S, le poste est à la position d'attente. La ligne arrive en L, passe par l'électro E, Z, V, S, le générateur d'appel J et continue en *l*.

2° Le frotteur est appuyé sur le contact *t*, le poste est en communication avec le poste central. La ligne L traverse l'électro-aimant E, passe par Z, *t*, la sonnerie G, U et *l*, ou bien si l'abonné a décroché son téléphone, ce qui provoque la manœuvre du levier K, passe directement de *t* aux contacts *b* et *a*, au microphone

M pour continuer encore par *l*. Dans cette deuxième position la sonnerie *a* est mise en court circuit.

3° Le frotteur est appuyé sur un point *r* de la couronne X. Le poste de l'abonné est tout entier mis en court circuit. — La ligne L passe directement par l'électro-aimant E, par *z*, *r*, *a'* et *l*.

Lorsque l'abonné veut appeler le poste central il se sert d'un appareil électro-magnétique figuré en G, muni d'un redresseur de courants et ne pouvant par suite affecter l'électro-aimant E. Le frotteur étant en S, c'est-à-dire à sa position de repos, les courants envoyés passent directement de J au ressort K, et se rendent au poste central par S, *z*, l'électro E et L.

Enfin, quand une communication est terminée, c'est le poste central qui se charge de ramener au repos tous les frotteurs. Il envoie pour cela une série de courants alternatifs sur la ligne qui font avancer tous les frotteurs jusqu'à ce qu'ils soient venus se placer sur le secteur S, une butée V empêche de le dépasser. On est donc sûr, en prolongeant un certain temps cette émission de courants, d'avoir ramené tous les frotteurs à l'origine commune du mouvement.

Il est évident qu'il faudra ensuite déclencher les frotteurs qui se trouvent en prise avec l'arrêt. Des électro-aimants V servent à cet usage, un courant d'intensité déterminé les actionne.

Il paraît inutile d'insister sur les inconvénients du système. Outre la complexité des manœuvres du système, j'en citerai deux principaux : aucune précaution n'a été prise pour garantir le synchronisme des frotteurs, et il y a en permanence sur la ligne autant d'électro-aimants que de postes embrochés.

Un deuxième système essayé avec succès pour deux

postes dans quelques installations privées françaises est dû à M. Sieur.

Bien qu'il eût été rationnel en apparence d'en donner la description lorsque les appareils de cette catégorie ont été étudiés, elle trouve ici sa place indiquée ; elle est en effet, comme on en jugera plus loin, le point de départ d'une solution assez simple du problème des postes en embrochages.

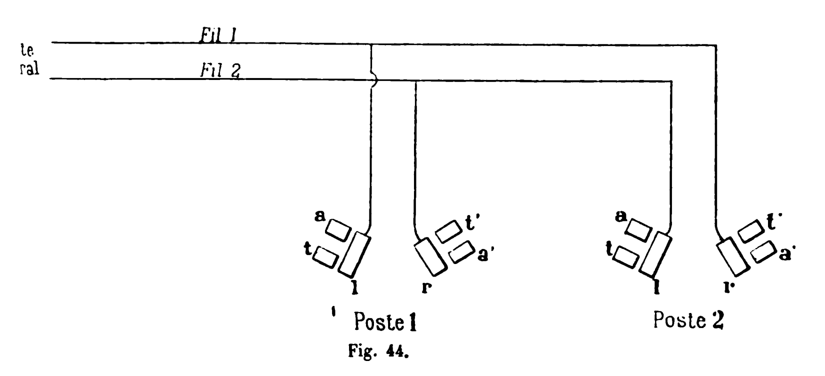


Fig. 44.

Chacun des deux postes est placé en dérivation sur le circuit principal (*fig.* 44). Leur insertion sur les deux fils de ligne est faite en sens inverse.

La *fig.* 45 représente le détail des communications dans l'un de ces postes : tous deux sont identiques.

Les organes essentiels qu'on y rencontre, outre les éléments habituels : sonnerie, microphone, etc., sont :

1° Un électro-aimant B appelé électro-commutateur à balancier ;

2° Un relai polarisé A à deux armatures fonctionnant chacune sous l'action d'un courant de sens différent.

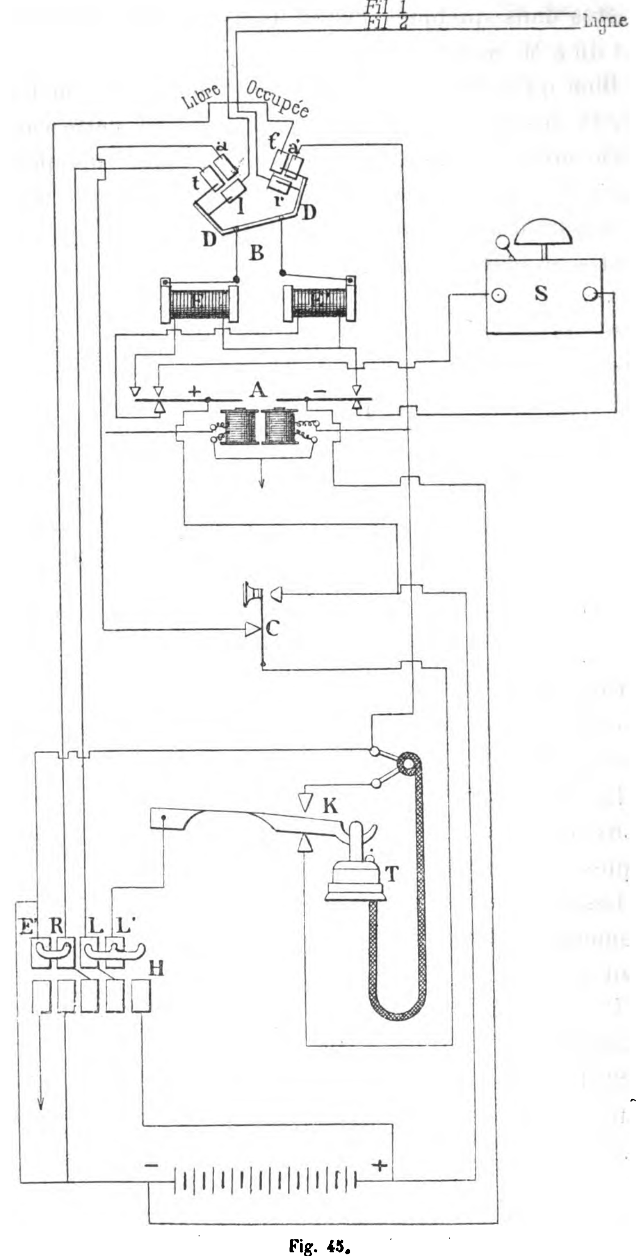


Fig. 45.

L'électro-commutateur à balancier (*fig.* 46) se compose d'un levier isolant CD mobile autour d'un axe O, et portant à ses deux extrémités deux frotteurs F_1 et F_2 destinés à glisser sur les contacts métalliques M, A, L, M', A', R.

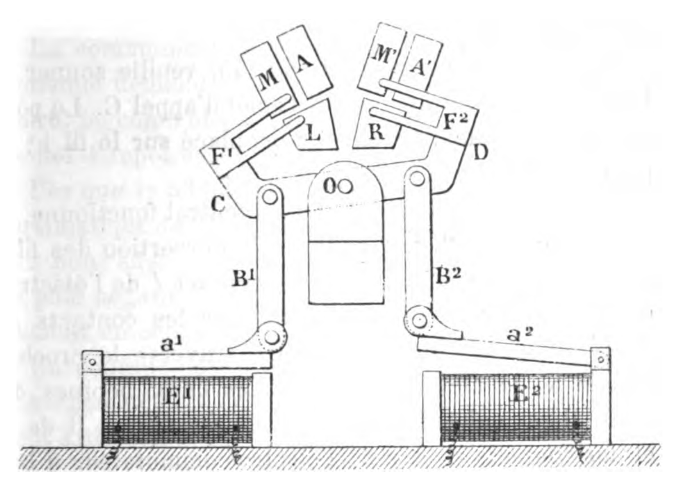


Fig. 46.

Les mouvements sont transmis à ce balancier au moyen de deux petites bielles B_1 et B_2 par les armatures a_1 et a_2. Ces armatures sont elles-même attirées par deux électro-aimants E_1 et E_2.

Suivant que l'un ou l'autre de ces électros fonctionne, le balancier CD s'incline à droite ou à gauche, les contacts L et R sont mis en communication avec A et A' ou M et M' et un voyant apparaît portant l'une des deux mentions : Libre — Occupé.

Le relai polarisé a déjà été décrit; il est inutile d'y revenir. Chacun des deux postes possède en outre en H les organes nécessaires à l'émission automatique du

courant de fin de conversation décrit déjà à l'occasion de la station automatique du système Sieur (*).

Le poste central est muni de deux clefs lui permettant d'envoyer à volonté un courant d'appel d'un sens ou d'un autre sur la ligne. Son annonciateur est polarisé. Un voyant indique donc toujours le numéro du poste appelant.

Supposons que le poste 1 (*fig.* 45) veuille sonner le bureau central. Il appuie sur la clef d'appel C. Le pôle positif de sa pile d'appel est ainsi placé sur le fil 1 ; le pôle négatif sur le fil 2.

Le récepteur polarisé du poste central fonctionne.

Dans le poste 2, par suite de l'intervertion des fils, un courant négatif entre par le contact *l* de l'électro-commutateur ; il passe ensuite par les contacts *t*, L, L′ (dans le commutateur H), traverse le crochet mobile K, la clef d'appel C et les deux bobines du relai. Il revient ensuite par les contacts E′ et R de H et les contacts *t′* et *r* de l'électro-commutateur à balancier.

L'armature du relai A marquée du signe — est attirée. Le courant de la pile locale est alors fermé sur l'électro-aimant E′ qui attire son armature et fait basculer le balancier.

L'aiguille amène le voyant « Occupé ». Les fils de ligne sont isolés de l'appareil téléphonique et reliés directement au relai A par les contacts *l* et *a* d'une part, *r* et *a′* de l'autre. Ce poste est donc immobilisé.

Le poste central répond en appuyant sur la clef d'appel du poste 1 ; il envoie ainsi un courant positif sur le fil 1.

Ce courant a pour effet, au poste 2, de faire fonction-

(*) Voir n° juillet-août 1890.

ner l'armature — du relai A, ce qui maintient le balancier dans la position « Occupé » qu'il a prise précédemment.

Au poste 1, au contraire, c'est l'armature + qui fonctionne et ferme le circuit de la pile locale sur la sonnerie S.

La communication du poste 1 avec le central ou l'abonné demandé se fait ensuite à la manière ordinaire, le commutateur à levier ayant mis hors circuit la clef d'appel et le relai A.

Dès que le téléphone est raccroché, le transmetteur automatique du signal de fin de conversation fonctionne. Il a pour effet, comme on l'a vu, de mettre à la terre le pôle négatif de la pile d'appel et d'envoyer simultanément un courant positif sur chacun des fils 1 et 2.

Un courant positif entre donc au poste 2 dans chacune des bobines du relai A dont les deux armatures sont attirées.

La pile locale est alors fermée sur l'électro-aimant E dont l'armature ramène le balancier CD à la position normale.

Tout est rétabli dans l'état initial.

Comme on peut s'en rendre compte par le détail qui précède, l'organisme de ce système est relativement peu compliqué et chacun des postes est relié au bureau central par deux fils seulement.

On conçoit tout de suite qu'il est facile en adjoignant un deuxième relai analogue au relai A de multiplier considérablement le nombre des abonnés reliés ainsi en embrochage.

La *fig.* 47 indique théoriquement un agencement de circuits qui permet d'actionner un quelconque des huit électro-aimants à l'exclusion des sept autres et

cela à l'aide des quatre armatures de deux relais polarisés.

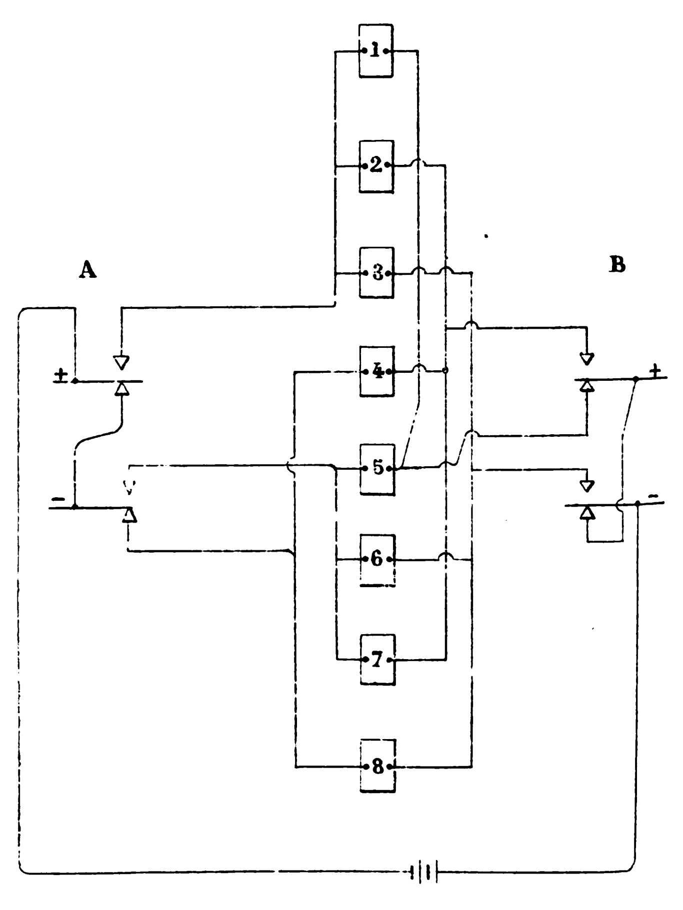


Fig. 47.

Voici la liste des jeux d'armatures correspondants à chacun des huit électro-aimants.

Relai A.	Relai B.	Électro-aimant actionné.
+	»	1
+	+	2
+	—	3
»	+	4
»	—	5
—	—	6
—	+	7
»	—	8

Deux relais polarisés permettent donc sur une ligne donnée à double fil de réaliser huit opérations distinctes.

Dans une communication téléphonique en embrochage deux opérations se font à l'aide du même procédé électrique dans tous les postes. Ce sont la réponse à un appel et le signal de fin de conversation, signal qui ramène à l'état libre les postes isolés.

Il reste encore six opérations distinctes possibles qui correspondront aux appels individuels des postes. On peut donc relier en embrochage six postes.

Un arrangement schématique de ce genre est effectivement représenté ici (*fig.* 48). On y a figuré un poste central et cinq abonnés.

Dans le poste central, A est un annonciateur polarisé, R est un relai polarisé également, dont l'armature est attirée sous l'influence d'un courant positif, R' est un relai ordinaire fonctionnant sous l'action d'un courant de sens quelconque. R, F, 1, 2, 3, 4, 5 sont les clefs d'appel destinées : R à répondre aux appels, F à donner le signal de fin de conversation (cette dernière clef est supprimée si chaque appareil téléphonique est pourvu d'un transmetteur automatique), les cinq autres à appeler le poste dont elles portent le numéro.

On a indiqué seulement sur le croquis, pour en faciliter la lecture, le signe du pôle des piles aboutissant à chacune des butées.

De même, dans les postes d'abonnement, S est la sonnerie, E et E′ sont les électro-aimants d'un électro-commutateur à balancier : on n'a point marqué leurs frotteurs. Rappelons que suivant que l'électro E ou E′, fonctionne, la ligne est mise sur les relais R_1 et R_2 soit directement, soit à travers l'appareil téléphonique.

R_1 et R_2 sont des relais polarisés à deux armatures, on a marquées chacune d'elles du signe + ou — suivant qu'un courant positif ou négatif les fait fonctionner. La clef R répond aux appels, la clef F donne le signal de fin de conversation (elle devient inutile comme dans le poste central en cas d'émission automatique de ce signal), les autres clefs enfin servent à appeler la station centrale ou les autres stations.

Supposons maintenant que le poste 5 désire le poste 2. L'abonné 5 appuie pour cela sur la clef 2 qui transmet un courant positif sur le fil 1 de la ligne et un courant négatif sur le fil 2.

Il décroche ensuite son téléphone pour mettre ses relais R_1 et R_2 hors du circuit et porte les écouteurs à l'oreille pour entendre la réponse du poste 2.

Au poste central les deux relais attirent leurs armatures, aucun courant local ne fait donc marcher l'annonciateur.

Dans les postes 1, 2, 3 et 4, l'armature + du relais R_1 et l'armature — du relai R'_1 sont attirées. Le circuit de la pile locale des postes 1, 3, 4, reste ouvert; au poste 2, au contraire, le courant de la pile locale est fermé : il passe en effet par l'armature + du relai R_1 et son contact supérieur, traverse la sonnerie et revient

au pôle négatif en passant par le contact supérieur de l'armature — du relai R'_1. L'abonné est bien appelé.

Le poste 2 répond en appuyant sur la clef R qui transmet un courant négatif sur le fil 2.

Le poste central n'est pas plus dérangé que la première fois puisque son relai R' marche seul : l'annonciateur A reste au repos. Aux postes 1, 3 et 4, au contraire, l'armature — du relai R_1 est attirée. Elle ferme le circuit de la pile locale dans l'électro-aimant E' de l'électro-commutateur. Dans chacun de ces postes, l'appareil téléphonique et les clefs d'appel sont alors exclus, et le signal « ligne occupée » apparaît.

Tous les appareils autres que ceux des postes 2 et 5 ont disparu de la ligne. Les deux abonnés causent en toute sécurité.

La conversation terminée, chacun d'eux accroche son téléphone, et si les appareils sont pourvus de l'organe nécessaire le courant de fin de conversation est envoyé automatiquement dans le sens voulu : sinon il faut appuyer sur les clefs F qui l'une et l'autre dans ce cas transmettent un courant positif sur la ligne 2, ramenant tous les postes en l'état initial.

En effet, chez les abonnés 1, 3 et 4, l'armature + du relai R_1 est attirée : le circuit de la pile locale se ferme sur l'électro-aimant E de l'électro-commutateur et le balancier revient à sa position primitive.

On pourrait évidemment mettre au poste central des relais polarisés et un électro-commutateur comme au cinq autres postes. Il a semblé, au contraire, plus pratique d'encombrer moins celle-ci en laissant aux abonnés embrochés sur le même fil le soin de correspondre directement entre eux. Lorsque le central veut établir une communication, il lui suffit pour s'assurer si le fil

est libre ou non d'écouter au téléphone ; il entendra si une conversation est déjà engagée ou non.

L'inconvénient de la solution de M. Sieur réside dans l'obligation de mettre une terre en dérivation sur chacun des postes. On sait qu'on arriverait facilement à l'atténuer en mettant en avant de la terre une bobine à forte self-induction sur laquelle est dérivé un condensateur.

Il est clair que le prix d'une pareille installation est également assez élevé.

Il faut remarquer en revanche qu'un dérangement dans l'une des stations n'entrave pas la marche des autres. C'est un avantage considérable sur tous les dispositifs en étoile. De plus les organes à adjoindre sont des électro-aimants robustes, et il n'y a pas nécessité de recourir à des courants d'intensités variables.

A ce double point de vue il était intéressant d'étudier ce dispositif en détail comme on vient de le faire.

E. ESTAUNIÉ.

(*A suivre.*)

NOUVEAU GALVANOMÈTRE BALISTIQUE

DE M. WILLYOUNG (*)

M. Willyoung vient de construire un nouveau galvanomètre qui parait présenter de sérieuses qualités. Il s'est efforcé de réaliser les conditions théoriques relatives à l'enroulement et à la forme des bobines ; il a, de plus, employé un système de sensibilisation imaginé par M. Northrup, système qui semble, dans le cas des galvanomètres balistiques, remplacer avantageusement l'aimant directeur employé jusqu'ici.

Les points intéressants à signaler dans la construction de l'instrument sont les suivants : isolement de l'appareil, enroulement et forme des bobines, variation de la sensibilité, suspension des aimants mobiles. Nous allons en faire la description.

Isolement. — Les bobines, au nombre de deux, et comprenant entre elles l'équipage magnétique, sont fixées à une traverse métallique qui repose sur deux colonnes d'ébonite cannelées et parfaitement polies. Comme ces cannelures ont la forme des deux côtés d'un triangle équilatéral, les colonnes ont une surface double de celle d'une colonne unie de même hauteur. La hauteur réelle est de deux pouces et demi; elle équivaut donc, au point de vue de l'isolement, à une hauteur d'environ 15 centimètres.

Enroulement. — M. Willyoung qualifie son enroule-

(*) *Journal of the Franklin Institute*, décembre 1892.

ment d'enroulement *à gradation*. Dans le galvanomètre ordinaire, dont le fil a partout une section uniforme, la limite de la quantité de fil à enrouler est

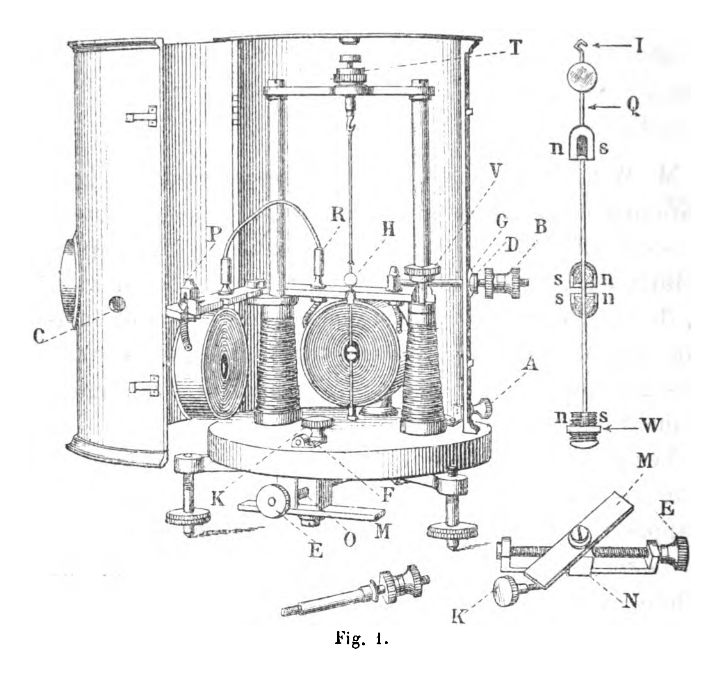


Fig. 1.

atteinte lorsque la diminution de l'action magnétique, due à l'accroissement de résistance électrique, est égale au gain obtenu par le tour de fil ajouté. Mais si, à ce moment, on augmente la section du fil, on obtient un effet utile en ajoutant de nouvelles spires, et cela sans qu'on puisse atteindre d'autre limite que celle qui est imposée par les conditions de commodité de l'instrument.

Ne pouvant pas faire varier le diamètre du fil d'une façon continue, comme le voudrait la théorie, M. Willyoung se contente de prendre cinq sections de fil

différentes. Il a constaté par expérience qu'un fil de section uniforme de même volume et de même résistance donne une sensibilité qui n'est que les 4/9 de celle obtenue avec cet enroulement particulier.

Forme des bobines. — La forme des bobines est la forme théorique qu'indique le calcul quand on cherche à obtenir l'effet magnétique maximum. La surface extérieure du fil enroulé doit être une surface de révolution qui a pour équation en coordonnée polaire :

$$u^2 = c^2 \sin \theta,$$

c étant une constante. La *fig.* 2 donne des formes de cette courbe correspondant à différentes valeurs de c.

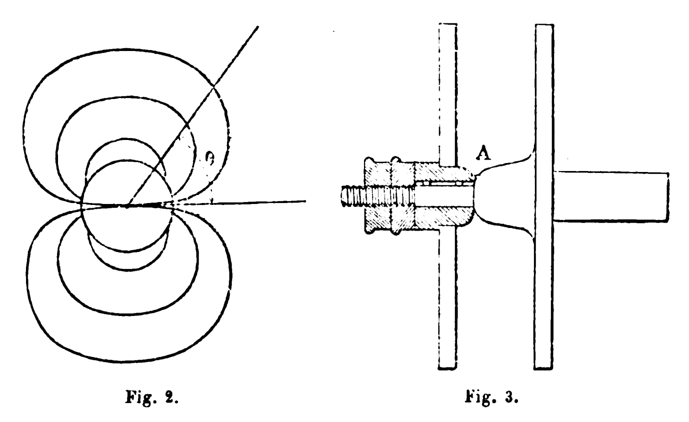


Fig. 2. Fig. 3.

La *fig.* 3 indique la forme de la partie centrale A de la bobine, forme calculée de façon que l'effet produit sur l'aimant qui est au centre soit maximum. Les deux bobines peuvent être montées en série ou en dérivation au moyen du fil R (*fig.* 1). La résistance de chacune d'elles est de 2.500 ohms ; la résistance totale du galvanomètre peut varier entre 5.000 et 1.250 ohms.

Sensibilité. — Nous arrivons à la partie essentielle-

ment originale de l'instrument. Il est facile de se rendre compte des inconvénients d'un aimant directeur extérieur au système astatique au moment où la sensibilité est maximum. Le système magnétique se trouve soumis à l'influence de deux champs, celui de la terre et celui de l'aimant directeur. Supposons les deux champs opposés l'un à l'autre (*fig.* 4*a*). Soient AB le champ terrestre, AC le champ de l'aimant directeur ; fermons le parallélogramme. AD représente le champ résultant en grandeur et direction.

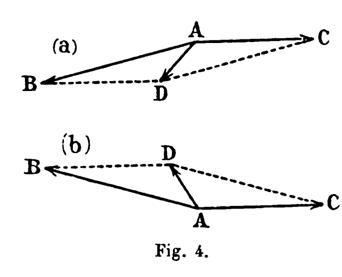


Fig. 4.

Supposons (*b*) que la direction du champ terrestre change légèrement, la résultante peut tourner de près de 180°, quoique le champ terrestre n'ait tourné que d'un angle très petit, et il se produit une déviation énorme du champ résultant; cette déviation est d'autant plus grande que la sensibilité de l'instrument est plus considérable.

M. Willyoung désigne ce phénomène sous le nom de *dérive* de l'aimant.

Ces considérations expliquent l'instabilité du zéro dans les galvanomètres très sensibles. M. Northrup a imaginé un nouveau dispositif basé sur les considérations suivantes :

Reportons-nous à la *fig.* 5, qui montre le principe du dispositif.

M est un aimant ordinaire en fer-à-cheval au sommet duquel est un barreau en fer doux AB. La distribution des lignes de force n'est pas pratiquement altérée par ce barreau ; en (*b*) nous avons le même aimant avec le barreau à mi-chemin des pôles ;

les lignes de force sont considérablement déformées, et plusieurs, attirées vers le bas, passent à l'intérieur de l'armature de fer doux. En (*c*), l'armature est placée sur les pôles eux-mêmes, et presque toutes les lignes de force passent à son intérieur; l'aimant est en court-circuit et n'est plus influencé par le champ magnétique, il se comporte comme un morceau de fer doux de même forme. Passons à la *fig.* 6, qui représente le système employé dans nos instruments. Le système est composé de quatre aimants en forme de cloche du type bien connu de Siemens; l'aimant supérieur et l'aimant inférieur ont leurs pôles orientés de la même manière; les deux aimants du centre sont orientés en sens contraire. L'aimant supérieur et inférieur forment un système astatique, ils sont un peu plus longs, et si tous sont aimantés de la même façon il servent à diriger le système.

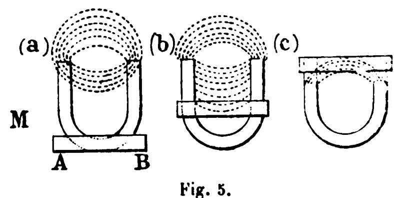


Fig. 5.

Si nous affaiblissons l'un des aimants extérieurs ou tous les deux à la fois, leur pouvoir directeur est diminué. La période d'oscillation du système est augmenté jusqu'à ce que finalement l'influence des aimants centraux commence à prédominer, et le système tourne alors de 180°.

Le dispositif employé pour affaiblir les aimants est très simple. L'aimant inférieur porte un pas de vis très fin et reçoit comme écrou un anneau étroit et léger de fer doux W. Quand l'anneau est à l'extrémité inférieure de l'aimant, son influence est nulle; pour avoir une sensibilité plus grande,

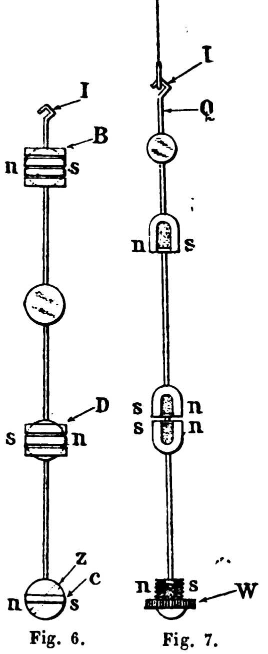


Fig. 6. Fig. 7.

on élève l'anneau en le faisant tourner. Pour faciliter cette opération, le système est attaché au fil de suspension par un petit crochet I, et peut être retiré au moyen d'une petite pince. L'anneau ayant été déplacé, le système est remis en place et sa période d'oscillation observée. On peut objecter que la mise en court circuit de l'aimant fait perdre une partie de son couple de déviation dû à l'action de la bobine. Ceci est exact, mais cette perte est très faible, car le couple agissant sur les aimants extérieurs est beaucoup plus petit que celui des aimants intérieurs. Les résultats obtenus en sont d'ailleurs une preuve. En se servant d'un aimant directeur, on a les résultats suivants :

Période (oscillation simple).	$4\ ^{17}/_{25}$ secondes
Déviation moyenne ($^1/_5$ microfarad à $1^v,44$).	100^{mm}
Dérive en 5 minutes.	$2,5^{mm}$

Avec le dispositif Northrup :

Période (oscillation simple).	$11\ ^1/_{10}$ secondes
Déviation moyenne ($^1/_5$ microfarad à $1^v,44$).	$211,5^{mm}$
Dérive en 5 minutes.	inappréciable

En rendant le système encore plus astatique :

Période (oscillation simple).	21,6 secondes
Déviation moyenne	237^{mm}
Dérive en 5 minutes.	inappréciable

Le système peut être appliqué aux galvanomètres existants. Par exemple, pour le galvanomètre Thomson, on prolongera l'axe de l'équipage mobile et on placera sur son prolongement un aimant possédant une armature mobile du genre de celles qui viennent d'être décrites.

M. Willyoung ajoute quelques détails, étudiés dans le but de rendre plus parfait le galvanomètre balistique. Pour éviter les pertes dues au frottement de l'air, il fait ses aimants de très petit diamètre et en forme de cloche. Pour augmenter le moment d'iner-

tie du système, il introduit dans les aimants des fragments de plomb maintenus par de la cire. La liaison du système astatique au fil de suspension obtenu au moyen d'un crochet I est défectueuse; dans les mesures de précision ce système peut tourner d'un petit angle sans entraîner le fil de suspension. L'inventeur conseille donc de cimenter ensemble les deux crochets par un peu de cire d'abeille.

Suspension. — La suspension est un fil de quartz extrêmement fin d'un diamètre de 7/10000 de pouce. Les avantages du quartz sont les suivants : il est insensible aux variations atmosphériques, il a un coefficient de torsion moindre que le fil de soie le plus fin; sa résistance à la traction est très grande, et il peut être obtenu en fils très fins. De plus, il présente cet avantage sur le verre et les autres métaux qu'une fois qu'il a été étiré il ne subit pas de mouvements moléculaires, comme on l'a constaté pour les réservoirs de thermomètre.

Ces mouvements se produisant dans le système de liaison des aimants du galvanomètre peuvent les faire déplacer l'un par rapport à l'autre et produire des *dérives*. Le quartz est exempt de ces inconvénients.

Le galvanomètre de M. Willyoung se recommande donc par de nombreuses qualités. Il présente néanmoins un inconvénient que son auteur reconnaît lui-même :

L'augmentation de poids que nécessite le nouveau système est assez petite pour être inappréciable, excepté quand il s'agit d'instruments fort délicats. D'ailleurs nous-mêmes nous ne l'avons pas adopté pour l'appliquer à des systèmes très légers et très petits, parce que la délicatesse de construction qu'il comporte est trop grande et demande trop de temps pour être

parfaitement exécutée. La délicatesse d'un pareil système est tellement grande au point de vue mécanique, pour les appareils légers, que je doute que ce dispositif puisse être appliqué utilement à ces sortes d'instruments.

On fait des galvanomètres Thomson dont le système mobile pèse moins de 350 milligrammes. Le poids de celui du galvanomètre balistique de M. Willyoung est de 4 grammes et demi. Son dispositif n'est donc réellement avantageux que pour les galvanomètres balistiques. Pour les galvanomètres ordinaires, M. Willyoung lui-même emploie un aimant directeur.

DEVAUX.

LA TRACTION ÉLECTRIQUE (*)

L'*American street Railway Association* a tenu, en octobre dernier, à Pittsburg, sa dixième réunion annuelle.

Ces réunions ont lieu toutes les années, dans une localité différente se signalant par un développement récent de « voies ferrés de rues » ou « tramways ». Les procès-verbaux de ces réunions contiennent des données intéressantes sur l'origine et le développement des divers modes de traction et entre autres de la traction électrique.

Dès la seconde réunion qui fut tenue en 1883, à Chicago, il fut fait mention des essais tout à fait embryonnaires de M. Vandepoele. Aucun service public n'était encore muni de ce mode de traction, et, en cette circonstance, il ne devait pas en être question au congrès de tramways de cette année.

Cependant le président de l'Association y fit allusion dans son allocution en ces termes : « Les *crude experiments* faits en ce moment à l'aide de l'électricité comme puissance motrice des trams, en lieu et place de la vapeur et des chevaux, font clairement prévoir le grand parti que nos besoins de trafic rapide nous permettront de tirer de ce nouveau moteur. »

En 1883, il ne fut pas autrement question de traction

(*) Communication de M. Dierman à l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore.



électrique; les autres mémoires présentés à la réunion de Chicago se rapportaient à la construction de la voie, aux procédés de traction, aux bâtiments de service, aux modes de perception de la recette, à l'enlèvement de la neige et de la glace, au pansage des chevaux, au chauffage et à l'éclairage des voitures. L'énumération de ces divers points montre de quel côté se dirige l'attention des « Street Railway men ». L'amélioration des services, leur rapidité, l'accroissement du trafic, les préoccupent davantage encore que les économies dans les frais de traction.

Je crois intéressant de vous signaler quelques-unes des questions résolues dans ces congrès pour bien vous montrer la tournure de l'esprit américain en matière de tramways. Le *Street Railway* est en effet l'âme du mouvement commercial des villes; le pavage est mauvais et tellement détruit par le transport des marchandises par des fourgons très chargés, que la circulation des voitures de place est très faible et très coûteuse. Une course en voiture coûte de 5 à 15 francs, suivant la localité, pour moins d'une heure. Un voyage de plusieurs kilomètres en tram coûte 25 centimes de taxe fixe.

Je remarque que l'on préconisait à ce moment (en 1883), pour les petites villes, les voies ferrées de rues à petit écartement. L'on rejetait alors le rail vignole pour cet usage, donnant comme raison l'impossibilité de maintenir l'écartement et l'attache du rail par suite des coincements du pavage.

Il est intéressant de noter que l'on rejetait également l'emploi de la vapeur comme procédé de traction.

On signalait des défauts d'adhérence aux locomotives, la nécessité d'une voie lourde et une délicatesse

de mécanisme incompatible avec la maladresse du personnel employé sur les lignes.

C'est à ce moment que fut introduit le type définitif du « girder rail », le véritable rail américain de tramway.

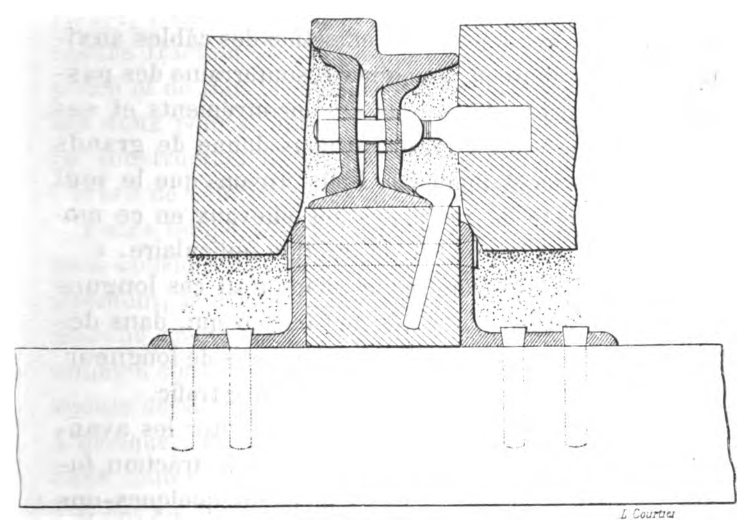


Fig. 1.

C'est un rail à très large rainure et à large bourrelet très peu saillant; la rainure est très peu profonde. Nous représentons en *fig.* 1 ce type de rail. Le rail est porté sur des longrines en chêne fixées par équerres en fer sur des traverses en chêne. Des tirants dont les écrous serrent les éclisses passent dans le pavage et maintiennent le rail vertical.

A cette même réunion de 1883 on émettait l'opinion suivante sur la traction funiculaire des tramways, qui s'est beaucoup développée en Amérique : « Leur succès n'est qu'une question de temps. La traction par câble, au point où elle en est aujourd'hui, n'a encore de va-

leur que dans des circonstances particulièrement favorables de trafic intense et de tracé rectiligne. En ce qui concerne les difficultés du passage en courbe, le génie des inventeurs aura, avant longtemps, découvert les moyens de tourner ces difficultés, car les grandes objections qui subsistent contre les dispositions actuelles sont les dépenses d'entretien des câbles auxiliaires et de toute la machinerie souterraine des passages en courbe. Avec tous ses inconvénients et ses défauts, ce procédé de traction nous donne de grands espoirs de succès financier. Nous croyons que le seul moyen pratique de remplacer les chevaux en ce moment même est le procédé de traction funiculaire. »

C'était à ce moment qu'on inaugurait ces longues lignes de traction par câble de Chicago qui, dans des rues absolument droites de 15 kilomètres de longueur, rencontrent les avantages d'un immense trafic.

Notre but n'est pas, en passant, de citer les avantages et les inconvénients inhérents à la traction funiculaire; nous en indiquons cependant quelques-uns pour bien montrer que le mode de traction dont le seul avantage sur les chevaux est celui qui résulte de l'emploi d'un moteur mécanique, s'est fort bien développé malgré ceux-ci. La traction funiculaire a un bas rendement qui, d'après les comparaisons que j'ai pu effectuer quant au prix, par voiture-kilomètre, de l'énergie motrice par ce procédé et par la traction électrique, ne dépasse pas 25 p. 100 (rapport entre l'énergie à la jante des roues et l'énergie au cylindre du moteur à vapeur, moyen annuel); ce rendement n'est atteint qu'en ligne droite, alors qu'ainsi qu'on le verra plus loin, les lignes électriques sont très sinueuses en général. Enfin, la vitesse d'une ligne à câble est cons-

tante pour les tronçons mus par un même câble; la voiture est entièrement indépendante du câble dont les accidents sont toujours graves.

A New-York, en 1884, au congrès de « Street Railway », sur un éloquent discours de M. Calvin A. Richard, l'assemblée se prenait d'enthousiasme pour la future traction électrique; les expériences de Vandepoele et de Daft prenaient une importance croissante; les deux points faibles du système étaient signalés : la construction du moteur et la transmission entre l'arbre de celui-ci et les essieux moteurs.

Entre temps, la traction par câble prenait l'extension considérable que l'on connaît et, en 1889, brusquement, la traction électrique se faisait jour sur le marché américain. Il s'agit, bien entendu, des systèmes à conducteur aérien. Nons n'entrerons ici dans aucun détail relativement aux essais infructueux en Amérique, des systèmes par accumulateurs et par conduits souterrains.

C'est au congrès de Minnéapolis, en 1889, que furent présentés les premiers chiffres réellement pratiques sur l'exploitation d'une ligne électrique.

L'introduction de la traction électrique dans le domaine commercial est donc récente; c'est à partir de 1889 que le développement du nouveau système de tramway a pris cet immense essor, et on le doit en grande partie au nom de Sprague, qui avait terminé en 1888 son système tel qu'il existe encore.

Le congrès de Pittsburg, en 1891, a porté à son apogée le mouvement industriel vers le moteur électrique pour tramway.

A cette époque, j'ai eu la bonne fortune de recueillir aux États-Unis un certain nombre de renseignements,

durant une mission que j'ai obtenue du Gouvernement.

Je vais d'abord vous décrire d'une façon générale les principaux types en usage de moteurs pour tramways.

Cette description n'est pas une description complète de matériel de tramways; mais le moteur constituant ce qu'il y a de généralement essentiel dans les systèmes de traction électrique, et les accessoires, lignes, trolleys, rhéostats, parafoudre étant construits par des spécialistes qui les établissent en vue de chaque système, je ne m'occuperai pas de ces derniers dans cette note.

MOTEURS A DOUBLE RÉDUCTION.

Système Sprague. — Ce système comprend un moteur à tambour Siemens, monté sur un châssis pivotant autour de l'essieu à commander et porté par un ressort fixé au châssis de la voiture; le châssis du moteur supporte les coussinets d'un arbre intermédiaire engrenant par pignon et roue dentée avec l'arbre du moteur; l'arbre du moteur engrène de la même manière avec l'essieu moteur.

Le rapport de réduction est de 1 à 12.

En vitesse normale, l'armature du moteur tourne à 1.100 à 1.200 tours.

Ce mode de transmission avec arbre intermédiaire est appelé « double réduction gearing » (D-R-G). Sprague a été conduit à l'employer pour pouvoir marcher avec un rendement convenable au moteur d'un poids limité, c'est-à-dire avec une vitesse angulaire convenant à ce type de moteur. Cette double réduction est néanmoins coûteuse en énergie; Sprague avait

d'abord essayé de marcher sans arbre intermédiaire, en réduisant le diamètre des roues motrices; les inconvénients étaient plus graves : abaissement du mécanisme moteur dans la boue des rues, augmentation des frottements en marche et surtout au démarrage.

Les pignons de transmission de Sprague ont été l'objet d'une longue étude. Les pignons en acier et roues en fonte sont bruyants et s'échauffent; on a employé des pignons en feuilles de cuir pressées et découpées en dents d'engrenage. Ceux-ci sont silencieux mais s'usent très vite : ils durent deux mois. Le cuir non tanné (Rough Hyde) fortement comprimé est un peu plus durable. On a construit des pignons composés de disques alternés de cuir et d'acier; les disques d'acier coupent les roues. En graissant les pignons cuir, rough hyde, cuir et acier, la destruction est immédiate par suite du ramolissement du cuir. On a signalé qu'en bonne logique il fallait construire les roues en cuir ou cuir et acier, et les pignons en acier. Cela n'est pas praticable. La construction d'une roue dentée à dents de cuir ou cuir et acier serait fort difficile, fort coûteuse, tandis que celle des pignons ne l'est pas autant; un pignon ne coûte que 25 francs; le prix du remplacement est réduit en conservant les joues en fer du pignon, et ne remplaçant que les disques qui sont enfilés sur un tube muni d'une cale et pressés à l'aide d'un écrou vissé sur le tube. Le renouvellement des pignons représente plus de 1 centime par voiture-kilomètre.

Il importe de tenir compte des conditions de fonctionnement des pignons sur les voitures américaines. Les pentes et rampes sont très fortes, les routes et rues très poussiéreuses et très boueuses, les voitures

arrêtent et démarrent rapidement, en rampe, 5 et 6 fois (*) par kilomètre parcouru.

Le rhéostat de Sprague se compose de l'enroulement de deux inducteurs qui sont excités en dérivation et en parallèle. Un cadre à touches a ses segments reliés à divers points des enroulements qui sont sectionnés, et deux frotteurs mettent les balais en connexion avec des points à potentiels variables et croissants de ces enroulements. L'intensité plus grande qui porte dans les inducteurs, et qui est nécessaire au démarrage de l'armature, a pour effet de détruire à la longue l'isolement. Mais le champ magnétique est considérablement renforcé au moment où un couple moteur énergique est nécessaire, toute l'énergie fournie au circuit de la voiture étant absorbée par le moteur. Il en résulte un démarrage très rapide et économique.

La compagnie Edison, qui possède en ce moment les brevets Sprague, a amélioré ce système en intercalant un rhéostat en fer au moment du démarrage, le réglage de la vitesse se faisant par le dispositif Sprague. Ce dispositif (**), malgré ces inconvénients, a certains avantages pratiques : le conducteur de la voiture (motorman) manœuvre la marche en avant, en arrière, le réglage de la vitesse d'une seule main avec une seule manivelle, tandis que de l'autre main il manœuvre le frein.

Système Thomson-Houston (*D. R.*)

Ce moteur est très semblable comme type de machine au moteur Sprague. Il n'en diffère que par quel-

(*) Sur le plus grand nombre de lignes il monte au moins 6 voyageurs par voiture-kilomètre, et il en descend le même nombre.

(**) Voir, pour la description, pages 137 et 187 de leçons sur l'électricité par M. Éric Gerard, tome II.

ques détails de construction et par le réglage de la vitesse ou de la puissance du moteur. Thomson Houston emploie un rhéostat intercalé duns le circuit d'un moteur série. Une partie du rhéostat est bobinée en série avec le bobinage de l'inducteur, sur l'inducteur, de manière à accroître les ampères-tours au démarrage et en petite vitesse, pour une même intensité. Pour la marche en rampe, on introduit également ce bobinage spécial (loop) dans le circuit, sous condition de ralentissement, puisqu'on augmente le champ et la force *c. e. m.*

Système Short.

Le moteur à double réduction de Short est très semblable au moteur à simple réduction du même constructeur. Il n'en diffère que par les dimensions relatives des organes et l'existence d'un intermédiaire. Nous décrivons plus loin ce moteur.

MOTEURS A SIMPLE RÉDUCTION.

Ces derniers sont introduits seulement depuis fin 1890, commencement 1891. On se demande pourquoi. La raison est dans la foule de questions secondaires de construction du moteur et de ses accessoires qui absorbaient l'esprit des constructeurs. « L'esprit d'initiative des américains est tel, me disait le président d'une compagnie de traction électrique, qu'ils n'entament le perfectionnement de l'organe essentiel d'un ensemble, que lorsque les accessoires ont été complètement mis à même de faire produire à celui-ci un résultat définitif et industriel. » Il y a dans ces quelques

mots une signification commerciale importante qu'on néglige trop en Europe.

Lorsqu'on s'est rendu compte du coût d'entretien et de renouvellement des pignons, des coussinets de l'arbre intermédiaire, l'on s'est décidé à supprimer celui-ci, quitte à diminuer si nécessaire, le rendement du moteur; or cette nécessité n'existe pas : on peut abaisser le rapport de réduction à 5 ou à 6, ce qui permet encore de tourner à 4 ou 500 tours au moteur; mais le tambour Siemens devait être abandonné et c'est ainsi qu'avec le moteur à simple réduction, l'anneau Gramme a reparu, d'abord lisse, puis à dents. L'anneau Gramme avait encore cet avantage de permettre le renouvellement plus facile des segments brûlés. Autre détail de construction : on s'est aperçu que l'isolement des enroulements, dans une masse de caoutchouc vulcanisé, n'était pas nécessaire quoique employé d'abord par Sprague; l'on isole à la gomme-laque et au mica retenu par de la toile et de la fibre sectionnée. Les enveloppes en papier et en fibre d'une pièce, pour anneaux, ne conviennent pas ; elles se crevassent.

La suppression de l'arbre intermédiaire relève le rendement sur l'essieu de 10 p. 100, d'après M. Crosby. Ce chiffre paraît élevé, mais il résulte de comparaisons effectuées entre les anciens types à double réduction et les nouveaux moteurs à simple réduction dont le rendement en tant qu'appareils électriques a été aussi notablement accru.

D'après M. Badger, les frais d'entretien des moteurs s'élèveraient, pour les machines à double réduction, à :

Réparations aux moteurs	2f,16
— aux engrenages	1 ,86

A ce propos encore, il faut tenir compte de la grande

élévation du prix de la main-d'œuvre aux États-Unis; ces frais sont cependant importants et il était rationnel de chercher à perfectionner les systèmes à double réduction de vitesse.

Système Thomson-Houston, *fig.* 2. — C'est un moteur bipolaire à anneau Gramme sans dents, à bobinage des inducteurs sur les pièces polaires, dans lesquelles pénètre l'armature. La carcasse est en fer forgé et porte, par des paliers, les coussinets de l'anneau. Des coussinets embrassent l'essieu sur lequel on a tourné des portées. Le moteur repose ainsi d'une part sur l'essieu et d'autre part, à l'aide de deux tampons de caoutchouc, sur une traverse du truck de la voiture. Cette suspension élastique a pour but de conserver une distance invariable entre axes du moteur et de l'essieu, tout en évitant de faire peser d'une façon rigide tout le moteur sur le truck.

Un pignon est calé sur l'arbre du moteur et engrené avec une roue calée sur l'essieu; le rapport de réduction est 4,78. L'ensemble est enfermé dans une enveloppe contenant de l'huile épaisse; dans ces conditions la transmission par pignon en bronze et roue en fonte ou tous deux en acier est absolument silencieuse. Cette disposition d'engrenage dans l'huile a été appliquée pour la première fois aux moteurs de tramway par Westinghouse.

On voit (*fig.* 2) la disposition des porte-balais. Leur calage est invariable pour la marche en avant ou en arrière. Les frotteurs sont des blocs de charbon, emboîtés à frottement contre ressorts de contact dans le porte-balai et pressés perpendiculairement au collecteur par des ressorts à boudin. Il est indispensable que les collecteurs soient entièrement isolés au mica. Le

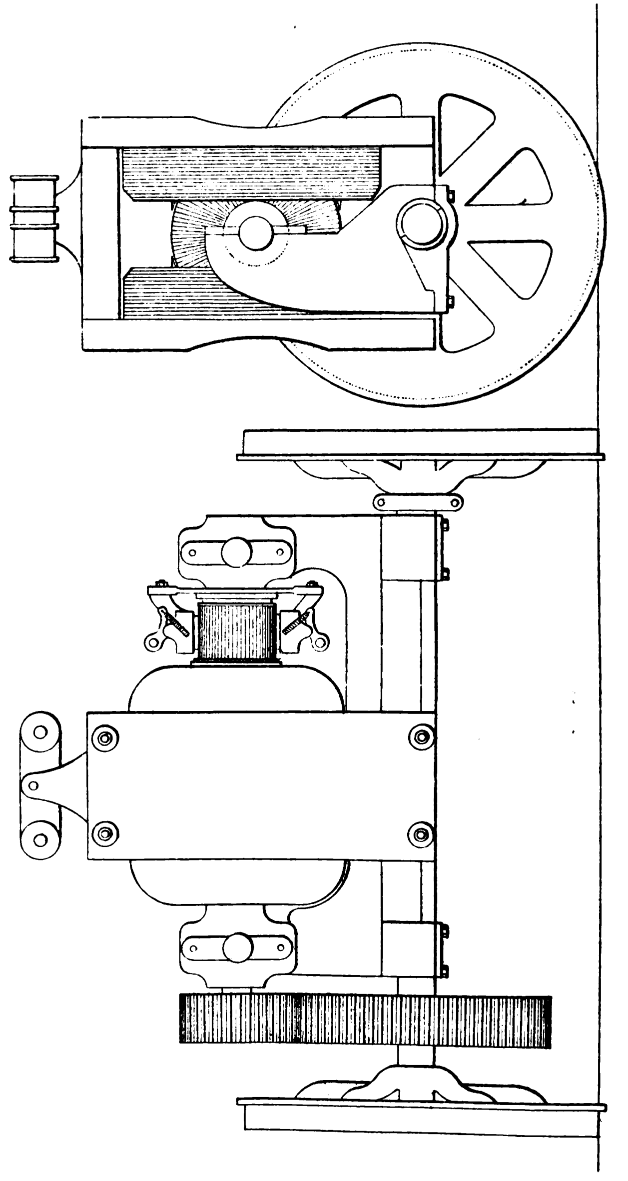


Fig. 2. — Thomson-Houston.

métal de ceux-ci est du bronze dit « tempered copper »; l'isolement au mica est employé également pour les rondelles coniques qui assemblent les lames sur la douille à vis calée sur l'arbre. Une toile est tendue entre l'anneau et le collecteur pour protéger les connexions. Les connexions sont très difficiles à faire. Les points faibles de la construction des moteurs de tramway sont les suivants : rupture des connexions au collecteur par les vibrations, rupture des frettes ou cerclages par usure d'un palier mal graissé, mauvais serrage du bobinage; rupture des étoiles de calage des tôles. Les défauts d'isolement qui se produisent le plus fréquemment sont des terres au collecteur; c'est de là que partent les accidents électriques de l'armature.

Les défauts d'isolement des inducteurs tiennent en général à l'introduction de boues ou de poussières.

Thomson-Houston Waterproof. — Le moteur précédent n'est pas à l'abri des boues, avons-nous dit.

La nécessité de protéger le moteur est réelle. Dans les débuts de la traction électrique on avait monté les moteurs au-dessus de la plate-forme de la voiture, la transmission se faisant par chaîne à l'essieu moteur. La place perdue sur la plate-forme était rachetée en attelant une seconde voiture à la première. Cette disposition est abandonnée depuis qu'on a pris le parti de monter les moteurs sous les plates-formes, ce qui a permis de construire la transmission simple à laquelle on est arrivé.

Le moteur Thomson-Houston W. P. est représenté *fig.* 3.

La carcasse se compose de deux parties, l'une supérieure, l'autre inférieure, cette dernière étanche, la supérieure n'ayant d'ouverture que pour l'inspection

du collecteur et le passage des pièces. Le bobinage est fait sur la pièce polaire supérieure qui affecte, comme on le voit, une forme particulière venue fonte et établie en raison des dérivations magnétiques entre l'anneau et la carcasse. Les sections de fer dans la carcasse sont plus grandes que la coupe tend à le faire supposer, par suite du développement latéral de la culasse.

D'ailleurs, d'une façon générale, les fontes travaillent dans les moteurs de tramway à une saturation plus grande que lorsqu'il s'agit de moteurs fixes, dont les conditions de rendement ne sont pas les mêmes.

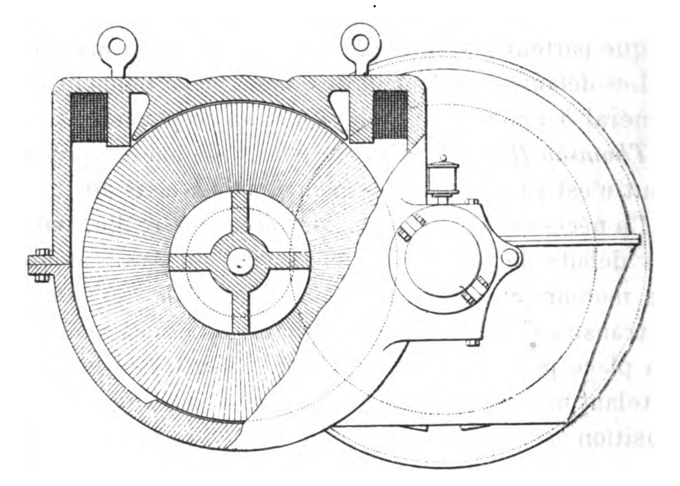


Fig. 3. — Thomson-Houston.

On voit à droite de la *fig.* 3, masquant la roue de l'essieu commandé, la caisse qui enveloppe les engrenages. Pour la légèreté et la facilité de montage, ainsi que pour éviter de trop grandes dérivations magnétiques, ces caisses doivent être en cuivre.

On emploie généralement les graisseurs à mèche ou

à graisse solide. On a fait usage des graisseurs à bague, mais les bagues cessent parfois de tourner lorsque la voiture secoue le moteur.

L'anneau du moteur Waterproof est denté et le bobinage est maintenu sans frettes au moyen de cales en bois. Les dents sont à section trapézoïdale à ouverture rétrécie vers la périphérie. Les coussinets peuvent être garnis en métal blanc.

Moteur Westinghouse. — C'est un moteur tétrapolaire (*fig.* 4) monté sur un châssis spécial portant les coussinets d'arbre et d'essieu.

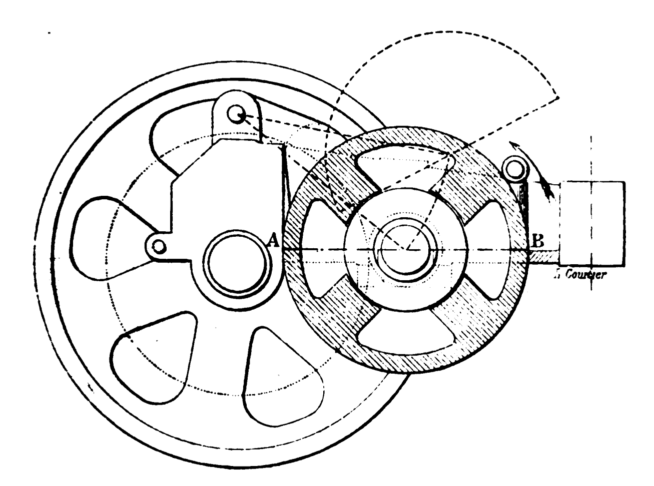


Fig. 4. — Westinghouse.

La carcasse des inducteurs est divisée en deux parties dont la supérieure pivote dans une charnière; il suffit de lever l'œillet pour mettre l'anneau à portée en ouvrant les inducteurs; le demi-cylindre supérieur de la carcasse prend alors la position figurée en pointillé. Le rapport de réduction des engrenages n'est que de 4.

Ainsi qu'on le voit, les quatre pièces polaires sont disposées pour porter le bobinage. La carcasse est en acier coulé.

L'induit Westinghouse est à trous et porte un enroulement à tambour. Il n'y a que deux balais; des connexions à 90 degrés intérieures sont ménagées dans l'enroulement.

Le réglage de la puissance de tous ces moteurs à simple réduction se fait à l'aide d'un rhéostat intercalé en série avec le moteur série.

Moteur Edison. — Le moteur Edison (*fig.* 5) est tétrapolaire avec deux pôles conséquents au-dessus

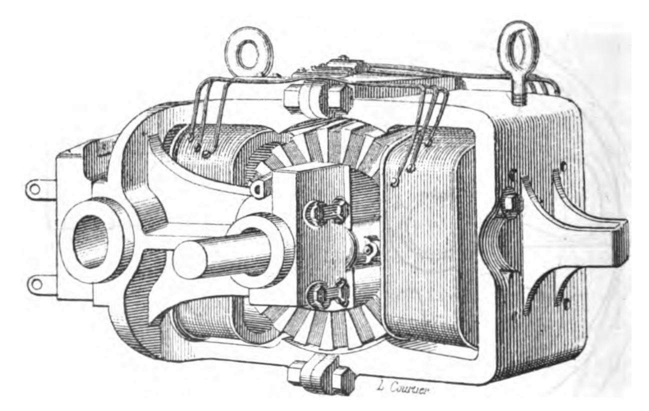


Fig. 5. — Edison.

et au-dessous, ceci afin de racheter la hauteur qui serait occupée par des bobines d'inducteur.

La carcasse en fonte est en deux pièces boulonnées et porte les coussinets d'essieu, ceux de l'arbre étant portés par des paliers venus de fonte avec une des moitiés d'inducteur.

L'anneau est à dents rectangulaires; les frettes en fil de bronze sont maintenues.

On voit, sur la figure, des connexions à plusieurs segments de l'enroulement de l'inducteur. Nous l'avons dit plus haut, la compagnie Edison a conservé le mode de réglage de Sprague, en intercalant en série un rhéostat à sections peu nombreuses.

Moteur Short. — Le moteur est tétrapolaire à induit aplati.

La construction en présente diverses particularités. Je signale l'absence des prolongements des épanouissements polaires vers la périphérie de l'anneau. Les lignes de force entrent par les faces latérales qui sont dentées. La section de fer de l'anneau est presque carrée au lieu d'être aplatie comme dans la plupart des anneaux plats; le noyau se compose de tôles enroulées sur un mandrin en fer et rivées ensemble. Les faces sont fraisées de manière à composer la denture dans laquelle les segments sont bobinés (*). L'isolement est au mica maintenu par du carton comprimé et de la toile de coton. La transmission se fait par pignon en acier et roue en fonte tournant dans une enveloppe à graisse. Le collecteur est accessible en dévissant une porte. La suspension est faite de la façon habituelle.

On distingue sur la figure les dispositions générales du moteur.

La disposition en question permet la suppression des cerclages; une usure de palier n'entraîne pas le frottement de l'anneau contre les pièces polaires qui sont latérales. L'absence de jeu latéral n'est pas un incon-

(*) Dans les derniers modèles, la denture n'existe que sur une partie de la surface de la joue. Les dents figurent dans des tenons qui servent de cales d'entraînement aux segments.

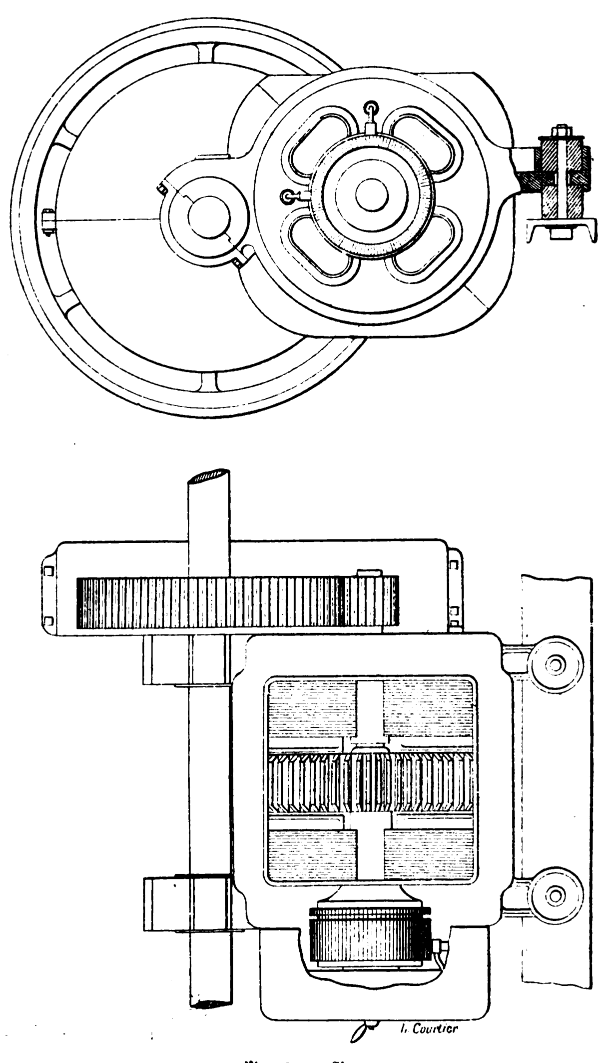


Fig. 6. — Short.

vénient. Le bobinage de l'anneau est aisé et ses réparations n'exigent pas le démontage de l'induit.

MOTEURS SANS RÉDUCTION DE VITESSE.

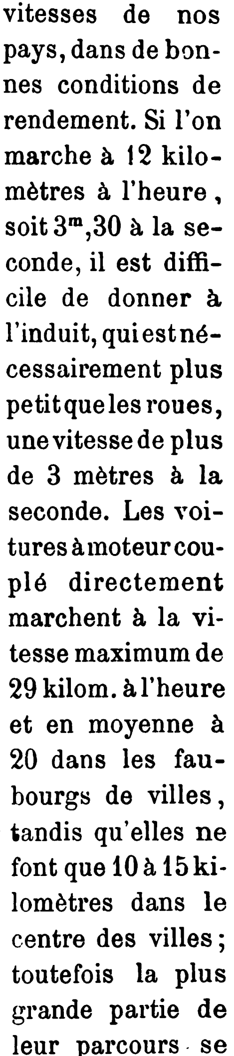
Ces moteurs sont désignés en Amérique sous le nom de *Gearless*. L'arbre du moteur a la même vitesse angulaire que l'essieu moteur avec lequel il est directement couplé par bielle et manivelle; dans d'autres cas l'induit est directement calé sur l'essieu ou sur un tube concentrique à l'essieu qui se déplace à l'intérieur de celui-ci.

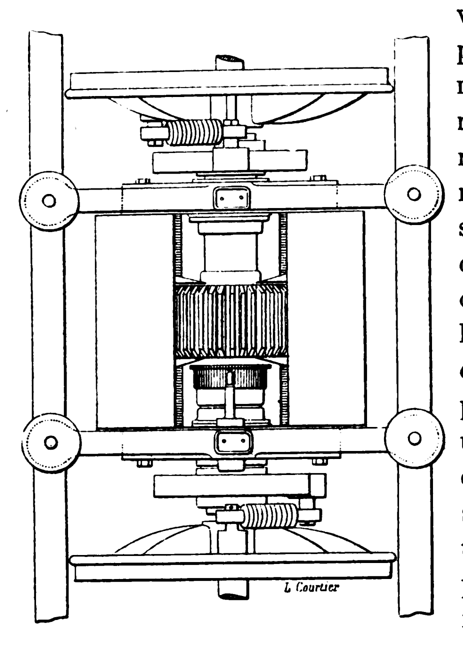
La disposition par bielle et manivelle vient d'être réalisée par Eickmeyer; le calage direct de l'induit sur l'essieu a été adopté par Westinghouse.

Nous n'avons pu obtenir d'indications que sur un moteur *Gearless* de la Short Electric Railway que nous représentons en coupe et en plan, *fig*. 6.

Ce moteur est à anneau plat (section carrée), bipolaire. La culasse des inducteurs porte des paliers et est fixée par deux pattes latérales, à l'aide de bourrelets en caoutchouc, sur deux traverses faisant partie du châssis du truck de la voiture. Dans ces paliers tourne un arbre creux représenté par un trait de force en coupe verticale. L'essieu passe avec un jeu de 25 millimètres à l'intérieur de cet arbre creux et est porté par des boîtes à graisse ordinaires mobiles sur ressorts dans les plaques de garde. Un plateau est calé à chaque extrémité de l'arbre creux; un ressort à boudin, remplacé ensuite par du caoutchouc, est tendu entre le plateau et un point de la roue, de sorte que le mouvement de rotation de l'arbre du moteur est transmis avec une certaine douceur à l'essieu moteur. Le moteur étant ainsi entièrement suspendu, souffre moins que dans les systèmes à réduction, à cause des trépidations de l'essieu.

Il est visible que ces moteurs ne sont pas, pour les vitesses de nos pays, dans de bonnes conditions de rendement. Si l'on marche à 12 kilomètres à l'heure, soit 3^{m},30 à la seconde, il est difficile de donner à l'induit, qui est nécessairement plus petit que les roues, une vitesse de plus de 3 mètres à la seconde. Les voitures à moteur couplé directement marchent à la vitesse maximum de 29 kilom. à l'heure et en moyenne à 20 dans les faubourgs de villes, tandis qu'elles ne font que 10 à 15 kilomètres dans le centre des villes; toutefois la plus grande partie de leur parcours se faisant dans les faubourgs et les campagnes, le rendement moyen est assez bien relevé par l'adoption de ces





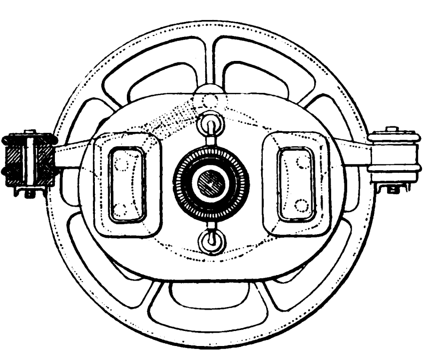


Fig. 7. — Gearless.

vitesses qui n'ont rien d'exagéré lorsqu'on y est accoutumé. Aux vitesses de 8 mètres à la seconde ainsi obtenues à la jante des roues, soit 7 mètres à l'induit, le rendement peut atteindre 80 p. 100.

Il ne faut toutefois pas s'exagérer l'importance du facteur rendement du moteur. Le prix de revient de la voiture-kilomètre a une toute autre importance dans le cas qui nous occupe. Or, la suppression de toute espèce d'engrenage ou de transmission, la suspension sur ressorts de tout le moteur, la diminution du nombre de coussinets à graisser qui, de huit par essieu dans les systèmes à double réduction passe à quatre pour les systèmes à couplage direct genre Short, toutes ces raisons influent considérablement sur les dépenses d'entretien et de réparation ainsi que sur le rendement final.

Il me paraît difficile d'établir dès maintenant les modifications qui seraient apportées dans le rendement total d'une exploitation par moteurs Gearless et par moteurs à simple réduction.

La Compagnie qui exploite les moteurs Gearless garantit pour les réparations par voiture-kilomètre, les dépenses suivantes :

Double réduction	3,1	centimes	par voiture-kilomètre.
Simple réduction	2,3	—	—
Gearless	1,5	—	—

L'expérience de ces derniers moteurs n'est pas encore longue ; les lignes sur lesquelles ils fonctionnent ne sont pas armées exclusivement de ce système et il est impossible de conclure formellement.

Je suis cependant convaincu qu'il faut adopter le moteur sans transmission, à couplage direct, pour toutes les lignes qui peuvent marcher à plus de 15 à 18 kilo-

mètres à l'heure, surtout si elles vont dans les faubourgs, vers les campagnes où les voies sont le plus souvent mauvaises et mal entretenues. Il est absolument certain que toutes les lignes que nous désignons sous le nom de chemins de fer vicinaux seront à traction électrique sous très peu d'années; le moteur Gearless trouvera là sa place toute marquée.

TRUCKS POUR VOITURES ÉLECTRIQUES.

Je crois utile de dire un mot des trucks pour voitures électriques afin de faire comprendre le mode de montage des moteurs.

Dans l'origine, le moteur à transmission par engrenages était monté sur un châssis en fonte de manière à former un tout, moteur et transmission. Ce châssis portait deux coussinets à l'aide desquels il posait sur l'essieu à commander, tandis que la roue dentée, calée sur l'essieu, prenait le pignon de l'arbre intermédiaire du moteur; d'autre part, ce châssis, qui devait pouvoir tourner autour de l'essieu d'un certain angle par suite des inégalités de la voie et de la flexion des ressorts qui supportaient les boîtes à graisse, était fixé en un point du plancher de la voiture à l'aide d'un ressort.

On a conservé le principe de cette disposition, mais on ne fixe plus la suspension élastique du moteur au plancher de la voiture, mais en un point du truck.

Dans les dispositions actuelles, la suspension à ressort est fixée à un truck qui est solidaire des boîtes à graisse. La caisse de la voiture n'est plus solidaire que des plaques de garde par les ressorts desquelles elle porte sur les boîtes à graisse des essieux. Ces trucks sont différents, selon qu'il s'agit de voitures à deux

essieux ou à quatre essieux montées sur deux boggies.

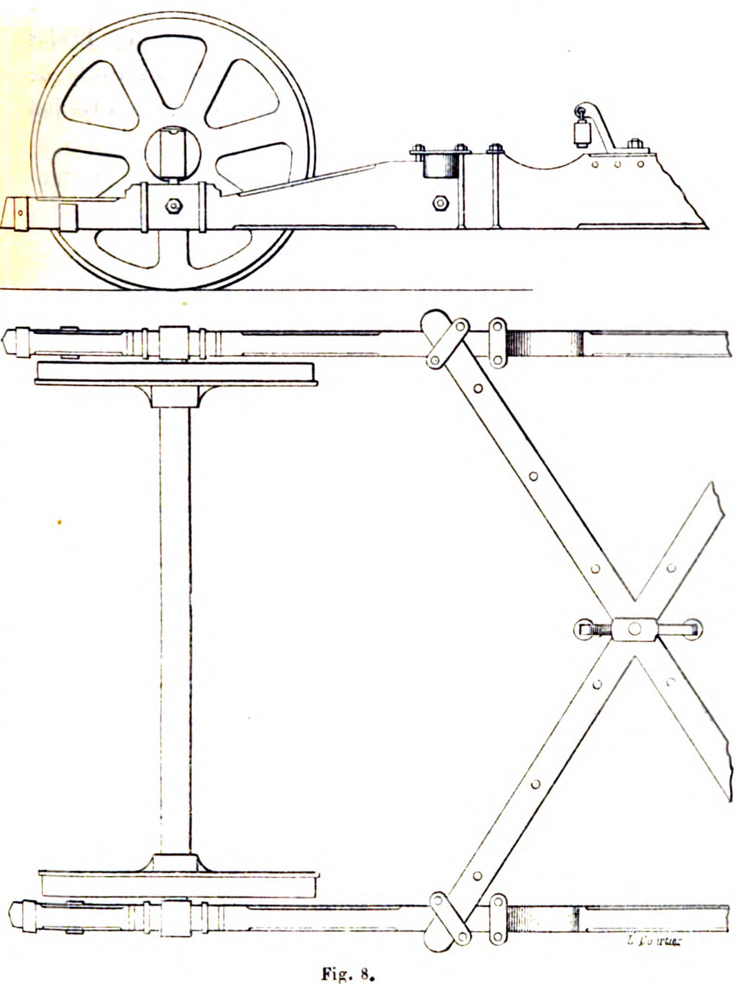


Fig. 8.

Truck en bois pour voiture à deux essieux (fig. 8).

Ainsi que le montre le croquis, le truck se compose de deux longrines en bois amincies aux extrémités et

fixées par une bride *au-dessous* des boîtes à graisse. Ces deux longrines sont rendues solidaires par une croix de Saint-André. Le tout est relié par des brides en fer et boulons de serrage. On voit sur la gauche de la demi-figure, c'est-à-dire au milieu du truck, le crochet de suspension du moteur.

La voiture, avec ses plaques de garde, vient descendre sur les boîtes à graisse et est complètement indépendante du truck.

Truck en fer (fig. 9).

Le même châssis peut se construire en fer; les longrines qui réunissent les boîtes à graisse, emboîtent

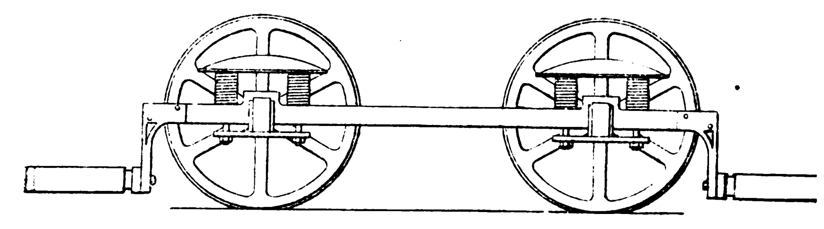


Fig. 9.

celles-ci et portent aux extrémités des traverses avec chasse-pierres en bois sur toute la largeur de la voie.

On a représenté les plaques de garde avec ressorts à boudin, sur lesquels la caisse de la voiture repose.

Truck « Boggie. »

La *fig.* 10 montre un truck d'une voiture à quatre essieux sur deux boggies, pivotant autour d'un axe portant la caisse.

Dans ce cas particulier, il s'agit d'un truck désigné sous le nom de *maximum traction truck*. Il se compose

de deux essieux, l'un portant des roues de grand diamètre, l'autre des roues de petit diamètre ; les grandes roues sont celles de l'essieu moteur ; l'autre essieu est porteur. Le pivot du truck est très rapproché de l'essieu moteur, de sorte que le poids adhérent est augmenté notablement ; de plus on dispose d'un espace libre au-dessus des petites roues qui ne servent que de guides.

Le châssis est fixé d'une manière rigide aux boîtes à graisse ; les ressorts de suspension de la caisse ne sont pas représentés ; ils se trouvent entre le châssis du truck et le pivot. On voit à l'avant et à l'arrière des chasse-neige composés d'une tôle pliée en angle, en place de manière à rejeter les pierres sur le côté de la voie.

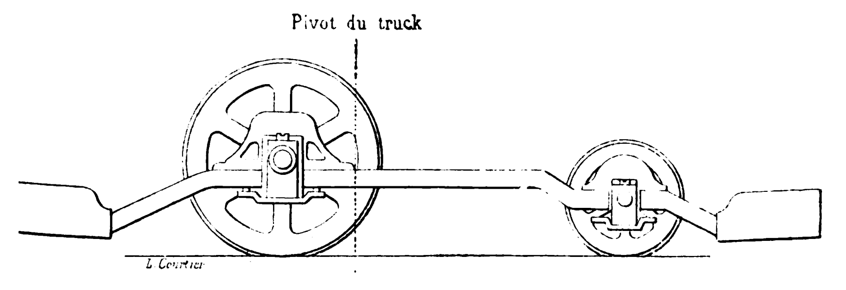


Fig. 20.

Je terminerai cette note par l'exposé de quelques expériences qu'il m'a été donné de faire en Amérique, sur diverses lignes de tramways électriques.

Les expériences que je décris ont toutes été exécutées à l'E. C. R. R. C°, dans une ville de l'État d'Ohio.

L'usine centrale comprenait :

Trois machines rapides Armington et Sims de 200 HP commandant par courroies six dynamos Edison de 100 chevaux, compound à 500 volts.

Trois machines rapides, même système, de 125 chevaux commandant 6 dynamos Édison de 50 chevaux.

Elle avait débuté il y a quatre ans par deux machines de 125 chevaux.

Actuellement, l'installation ci-dessus de 975 chevaux étant devenue trop faible, on monte une usine nouvelle comprenant 2 machines Corliss de 500 chevaux, monocylindrique, à 85 tours, commandant par un arbre intermédiaire 6 dynamos Édison de 200 chevaux.

La longueur des voies est de 64^{km},5; la longueur des rues desservies de 31^{km},5.

Le rail est du type représenté *fig.* 1, légèrement modifié.

Les voies sont toutes de niveau, sauf quelques pentes de raccordement et une rampe de 5 p. 100 sur 120 mètres.

Il y a 85 voitures armées de 2 moteurs à double réduction ; 140 voitures sans moteur, que l'on remorque avec les voitures-moteurs selon les besoins du service. La moyenne journalière des voitures en service est de 70 voitures à moteurs et 70 voitures de remorque.

Le parcours annuel est de 7.449.000 voitures-kilomètres.

La puissance motrice installée est de 975 chevaux, pour une moyenne de 140 moteurs (2 fois 70 voitures) en service, soit 695 chevaux par moteur de 15 chevaux.

Cette prédominance des moteurs sur la génératrice, tient à la nécessité de pourvoir à certains jours, sur certaines lignes, à un service exceptionnellement actif, alors qu'il est réduit sur d'autres lignes. D'un autre côté, en faisant usage de moteurs de 15 chevaux, on possède des outils bâtis solidement et pouvant supporter les trépidations du roulement.

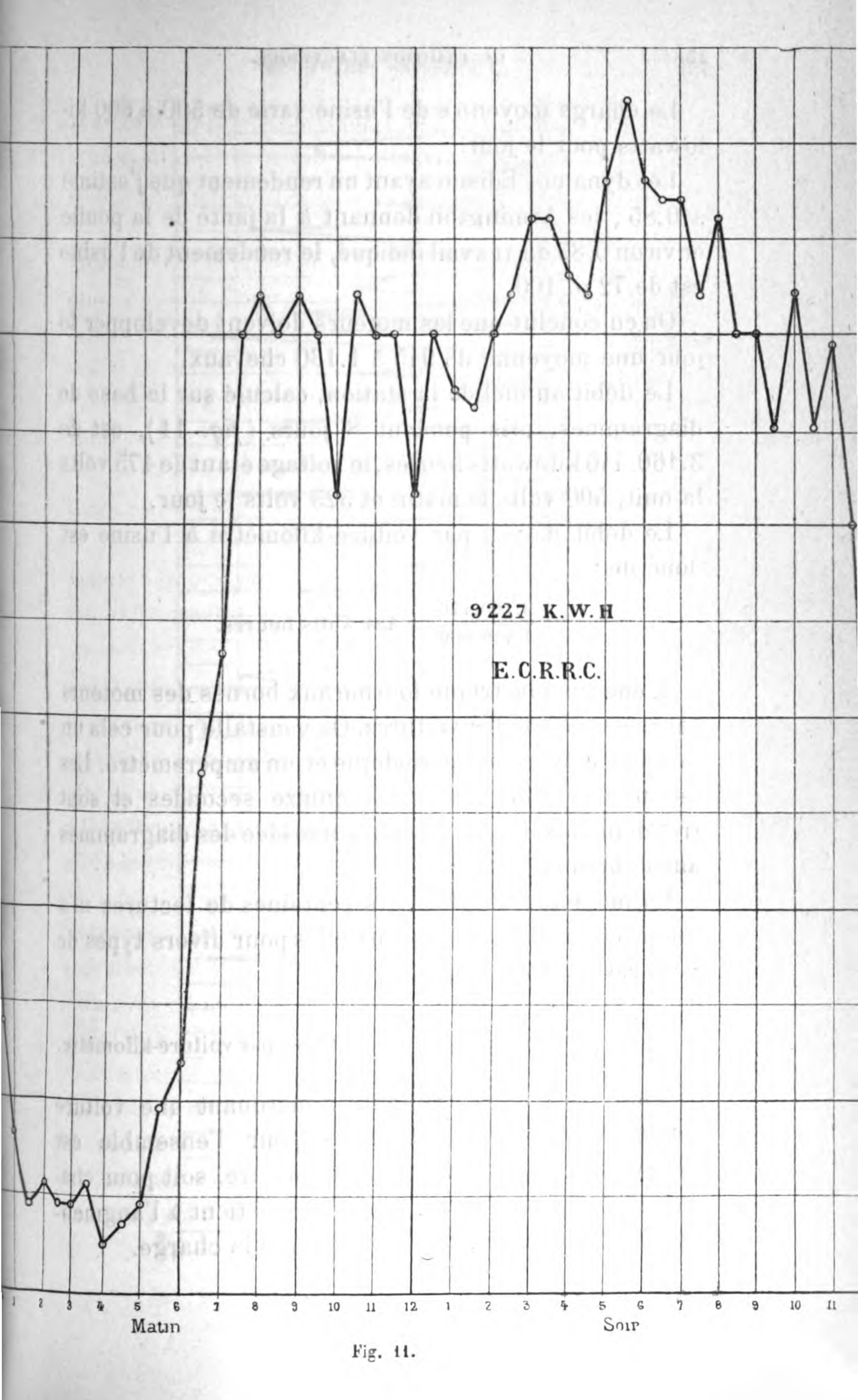


Fig. 11.

La charge moyenne de l'usine varie de 500 à 600 kilowatts pour le jour.

Les dynamos Édison ayant un rendement que j'estime à 0,85 ; les Armington donnant à la jante de la poulie environ 0,85 du travail indiqué, le rendement de l'usine est de 72 p. 100.

On en conclut que les moteurs doivent développer le jour une moyenne de 945 à 1.130 chevaux.

Le débit annuel de la station, calculé sur la base de diagrammes, pris pendant 8 jours (*fig.* 11), est de 3.160.446 kilowatts heures, le voltage étant de 475 volts la nuit, 500 volts le matin et 525 volts le jour.

Le débit moyen par voiture-kilomètre à l'usine est donc de :

$$\frac{3.160.446}{7.449.000} = 424 \text{ watts heures.}$$

L'énergie électrique fournie aux bornes des moteurs est mesurée sur les voitures. On y installe pour cela un voltmètre Weston apériodique et un ampèremètre. Les lectures se font toutes les quinze secondes et sont très délicates. La *fig.* 12 donne une idée des diagrammes ainsi obtenus.

La moyenne de plusieurs centaines de lectures m'a donné comme moyennes partielles pour divers types de voitures sans remorque :

$$\frac{357+467+345+325}{4} = 373 \text{ watts heures par voiture-kilomètre.}$$

Pour les voitures moteurs remorquant une voiture ordinaire, l'énergie dépensée pour l'ensemble est 542 watts heures par voiture-kilomètre, soit pour chacune 271 watts heures. La différence tient à l'augmentation du rendement du moteur avec la charge.

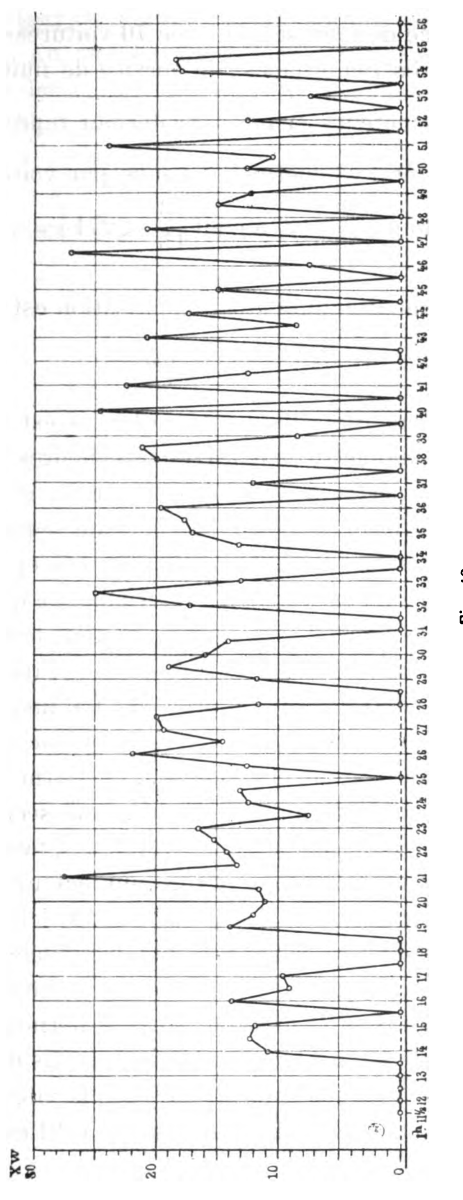

KW
30
20
10
0
1h 11½ 12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56

Fig. 12.

Le service de jour se fait avec 70 voitures-moteurs et 70 voitures remorquées ; le service de nuit à l'aide de voitures-moteurs seules ; ce dernier représente $\frac{2}{15}$ du service total ; l'énergie moyenne par voiture-kilomètre est donc $\left(\frac{2}{15} \times 373\right) + \left(\frac{13}{15} \times 271\right) = 285$ watts heures.

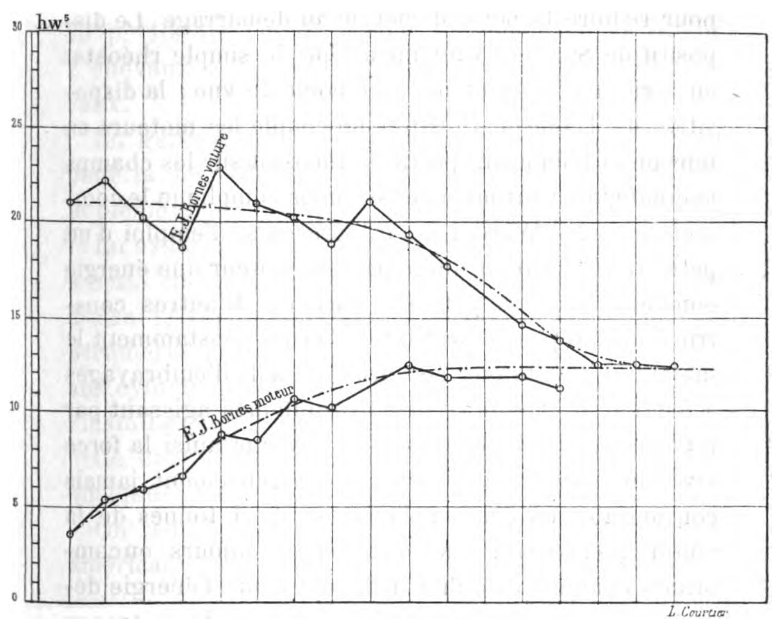
Le rendement annuel de la canalisation est donc

$$\frac{285}{422} = 67,5 \text{ p. } 100.$$

La consommation de charbon à l'usine est de $1^{kg},23$ par voiture-kilomètre ou par 422 watts heures à l'usine.

Parmi les pertes importantes d'énergie, il convient de citer les efforts au démarrage pendant lequel la très grande partie de l'énergie est transformée en chaleur. Il est extrêmement difficile de déterminer ce que représente la perte d'énergie au démarrage dans le rhéostat, à cause de la rapidité de celui-ci et des variations de courant. Voici comment j'ai procédé. J'ai installé dans le circuit d'une voiture, sur la voiture même, un ampèremètre dans le circuit des moteurs, un voltmètre entre la prise de contact mobile et la terre, un second voltmètre aux bornes des moteurs. Il fallait quatre opérateurs, un conducteur de la voiture, un lecteur à chaque voltmètre, un lecteur à l'ampèremètre. Voici comment les instruments se comportaient ; au moment où le rhéostat est fermé sur « démarrage », l'ampèremètre indique le maximum, le voltmètre aux bornes des moteurs indique un minimum et les indications de ce dernier croissent au fur et à mesure que la vitesse croît, jusqu'au moment où elles sont égales à celles du voltmètre de la ligne.

Le lecteur du voltmètre aux bornes commande les mesures. Au moment où il donne le signal du démarrage, les lecteurs pointent aussi rapidement qu'il leur est possible les indications successives de leurs instruments respectifs, jusqu'aux moment où le lecteur des voltmètres aux bornes donne le signal de la fin de la mesure. Chaque lecteur obtient ainsi un nombre *diffé-*



Durée : 40 secondes. — E = 420 volts.

Fig. 13.

rent de lectures faites, avec un peu d'habitude à des temps égaux pour *chacun*, pendant un temps total constant. Une interpolation permet de ramener toutes les indications à des intervalles de temps égaux pour tous les lecteurs. On arrive ainsi à des courbes dont un échantillon est représenté d'après une mesure faite sur un moteur Gearless (voir *fig.* 13).

Les courbes de démarrage se rapportant à la voiture moyenne de la ligne que j'examine donnent pour 2 démarrages par kilomètre, ce qui est à peu près la moyenne de la ligne, 125 watts heures perdus dans les rhéostats, alors que la voiture moyenne consomme 285 watts heures par kilomètre.

Un grand nombre de dispositions ont été étudiées pour réduire la perte d'énergie au démarrage. Le dispositif de Sprague vaut mieux que le simple rhéostat en série avec le moteur, à ce point de vue ; la disposition de Thomson-Houston qui couple les moteurs en tension et bobine une partie du rhéostat sur les champs magnétiques vaut mieux aussi, mais complique le commutateur. M. Ward Léonard préconise l'emploi d'un petit transformateur qui fournit au moteur une énergie constante sous un potentiel variable. D'autres constructeurs proposent de laisser tourner constamment le moteur et d'embrayer son arbre à l'aide d'embrayages à friction ou d'embrayages hydrauliques agissant par rétrécissement d'une valve, en utilisant ainsi la force vive du moteur, qui n'est malheureusement jamais considérable eu égard à la masse de 4 tonnes de la voiture ; en outre, ces mécanismes toujours encombrants coûtent plus cher d'entretien que l'énergie dépensée en chaleur dans les rhéostats ; celle-ci trouve d'ailleurs une utilisation immédiate dans le chauffage électrique des voitures qui entrent en usage depuis quelque temps. J'ai vu assez de voitures chauffées électriquement à l'aide de chaufferettes à fils de fer noyés dans une masse aplatie de plâtre enfermée dans une boîte en cuivre. Pour une voiture de 4^{m},85 le chauffage consomme un cheval électrique. Ce procédé est coûteux en charbon, mais évite la main-d'œuvre et les

dangers de l'entretien des poêles à coke et à anthracite dont toutes les voitures électriques sont munies en Amérique.

Le rendement des moteurs est fort variable; les chiffres les plus connus sont ceux des moteurs Sprague, dont le maximum est de 80 p. 100.

La perte d'énergie dans les engrenages varie de 40 p. 100 de l'effort transmis quand celui-ci atteint 2 chevaux, à 7 p. 100 lorsque celui-ci atteint 10 chevaux.

En général, le rendement du moteur est maximum pour la demi-charge et diminue de 4 à 5 p. 100 pour la pleine charge.

En examinant les rendements partiels, je suis arrivé à cette conclusion que le rendement à la jante, c'est-à-dire le rapport du travail effectif de traction à la périphérie des roues motrices, et le travail indiqué aux cylindres n'atteint pas 25 p. 100 en moyenne dans l'installation dont je parle.

Ce chiffre étant atteint, il est intéressant de fixer quelques données sur le prix de revient de la traction.

On remarquera que les prix unitaires sont des prix américains.

Prix de la force motrice.	Par voiture-kilomètre	
Charbon	0f,00678	0f,01195
Salaires des mécaniciens chauffeurs	0 ,00172	
Réparations à l'usine	0 ,00345	
Entretien du matériel roulant.		
Réparations aux moteurs et transmission	0 ,0285	0 ,0423
Réparations aux châssis et caisses	0 ,0138	
Autres dépenses d'exploitation.		
Gages : conducteurs et receveurs, réparations de la voie, etc.		0 ,2160
Total des frais d'exploitation		0f,27325

On paye les hommes :

Conducteurs	10f,00	par jour	(12 heures)
Receveurs. 1re année	8,75	—	(12 heures)
Receveurs. 2e année	9,50	—	(12 heures)
Mécaniciens à l'usine et à l'atelier	7f,50 à 15,00	—	(10 heures)

Le charbon coûte 5 francs la tonne, il ne représente d'ailleurs qu'une somme bien minime dans l'ensemble de l'exploitation.

Il est intéressant de mettre en regard les prix de la traction à Bruxelles, où le trafic est un peu plus faible qu'à Cleveland, il est vrai.

Salaires : receveurs et cochers	0f,12
Dépenses d'écurie	0,192
Entretien du matériel roulant	0,013
Entretien du matériel d'écurie, de sellerie, des voies, bâtiments, mobilier, lavage, graissage, etc.	0,034
Publicité, comptabilité contrôle, direction, eau, etc.	0,050
Pertes sur chevaux	0,001
Imprimés	0,0007
Total	0f,4107

M. Thow, commissaire du ministère des travaux publics d'Australie, a fait aux États-Unis, en 1890-1891, une intéressante étude sur le mode de traction le plus avantageux pour Sydney; il a conclu à la traction électrique par fil aérien. J'extrais de son travail quelques données de comparaison entre un tramway électrique et une ligne funiculaire. Ce dernier genre de traction est très répandu aux États-Unis; je suis convaincu que le rendement réel sur le grip de la voiture ne dépasse pas 25 à 30 p. 100.

Prix du travail de traction pour une ligne électrique et une ligne à câble.

	CABLE.	ÉLECTRIQUE.
Longueur de la ligne	15km,5	19km,6
Durée de l'essai comparatif	198	198 jours
Prix du travail de traction : Salaires, charbons, huile, graisse, menus frais, eau, réparations	14.978f,50	133.439f,40

	CABLE.	ÉLECTRIQUE.
Nombre moyen de trains par jour	20	25
Nombre total de voyages circulaires	61.380	82.630
Nombre de voyages par jour	310	417
Trains kilomètres	591.703	980.769
Nombre total de voyageurs	2.928.918	3.032.425
Durée d'un voyage, minutes	72	96
Arrêts à intervalle, minutes	8	10
Durée du voyage, arrêts déduits	64	77
Vitesse à l'heure	14km,6	15km,3
Prix d'un voyage	244cent,0	161cent,3
Prix par voyageur transporté	5cent,012	4cent,48
Si l'on admet un quart du voyage circulaire complet pour chaque voyageur, le prix du travail de traction par voyageur transporté est	2cent,12	1cent,45

Les deux installations sont pourvues de machines Corliss.

En terminant, j'émets le vœu de voir entrer bientôt notre industrie électrique dans la voie de la traction électrique. Je connais peu d'essais fructueux faits dans notre pays. En Europe, il n'y a guère qu'en Suisse que ce mode de traction ait un peu de succès. Pourtant, cette nouvelle industrie est pleine de promesses. Les installations de tramways électriques donnent de beaux bénéfices en Amérique, et la construction du matériel de tramways y est devenue très rémunératrice.

Quelques préjugés s'élèvent encore en Europe contre les canalisations aériennes au point de vue de leur aspect et du retour par la terre. Il suffira, j'en suis convaincu, d'une première ligne montée avec un peu de soin, à l'instar des nouvelles lignes de nos voisins d'Amérique, pour que toutes ces objections disparaissent.

RÈGLEMENT

RELATIF AUX

INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES

DE LA

NATIONAL ELECTRIC LIGHT ASSOCIATION

ADOPTÉ

PAR LA CONVENTION DE MONTRÉAL (*)

(Suite et fin.)

CLASSE C. — SYSTÈME A INCANDESCENCE (BASSE TENSION) 300 VOLTS OU MOINS.

Conducteurs aériens.

Les *conducteurs aériens extérieurs* doivent être : 1° établis conformément aux règles générales relatives aux conducteurs pour circuit à arc (séries) ; 2° distants l'un de l'autre de moins de 6 pouces au moins, là où ils entrent dans les bâtiments comme conducteurs de service et pourvus d'un coupe-circuit fusible à double pôle, aussi près que possible du point d'entrée dans le bâtiment et en dehors des murs, lorsque cela est pratiquement possible.

Conducteurs souterrains.

Les conducteurs souterrains doivent être : 1° pourvus de dispositifs convenables de protection aux extré-

(*) Traduction du *Bulletin de la Société belge d'électriciens.*

mités des fils de service, en tube ou en conduite à l'intérieur des murs des bâtiments, comme un moyen préventif contre l'humidité et la détérioration ; 2° terminés à un coupe-circuit de maison à double pôle, convenablement placé ; 3° formés de conducteurs spécialement isolés après la sortie du tube ou de la conduite et séparés d'au moins 10 pouces jusqu'à ce qu'ils parviennent au coupe-circuit à double pôle.

Fils intérieurs.

Les fils seront placés de façon que, dans le cas où leur enveloppe isolante vient à se détériorer, les conducteurs restent encore isolés.

A l'entrée de tout bâtiment, il y aura un commutateur à double pôle, établi sur les conducteurs de service, au moyen duquel le courant puisse être entièrement coupé.

Les *conducteurs* ne peuvent être : 1° d'un diamètre inférieur au n° 16 Brown et Sharpe, n° 18 B. W. G. ou n° 3 jauge Standard Edison ; 2° recouverts de plomb ou de paraffine ; 3° recouverts d'un tube de caoutchouc mou; 4° placés dans des moulures d'aucune sorte dans les places humides ; 5° plus dans les moulures à rainures ouvertes contre les murs ou plafonds ; 6° établis dans moulures là où il y a moins d'un demi-pouce ($0^m,0125$) d'isolant solide entre les fils parallèles et entre les fils et les murs ou plafonds.

Les taquets ne sont pas désirables et ne peuvent être employés que : 1° dans les locaux très secs ; 2° dans un endroit parfaitement accessible à la vérification en tout temps ; 3° ils sont de porcelaine ou de bois injecté pour prévenir l'absorption de l'humidité ; 4° ils sont disposés de telle façon que les fils de polarité contraire,

avec une différence de potentiel de 150 volts ou moins, soient tenus séparés l'un de l'autre d'au moins deux pouces et demi (0m,075) et que dans le cas où un voltage supérieur est employé la distance soit augmentée proportionnellement ; 5° on doit pourvoir un dos (backing) de bois d'au moins un demi-pouce d'épaisseur et injecté, pour prévenir l'absorption de l'humidité.

Des crampons de métal ne peuvent jamais être employés pour fixer les conducteurs, si ce n'est : 1° s'ils sont pourvus d'une selle isolante rigidement attachée au métal du crampon et ayant une rigidité et une largeur suffisante pour prévenir toute détérioration mécanique de l'isolant du conducteur ; 2° aux conditions auxquelles l'installation sur taquets serait admissible ou lorsque les fils sont tirés dans des moulures spéciales pour installation visible.

Fils spéciaux.

Partout où les conducteurs croisent les tuyaux métalliques à gaz, à eau ou autres ou d'autres conducteurs quelconques ou des matières conductrices (excepté les fils de lumière à arc), ils devront en être séparés d'un pouce (0m,025) au moins au moyen d'un non conducteur continu quelconque. Au croisement des fils à lumière d'arc, les conducteurs à basse tension doivent être établis à une distance d'au moins six pouces (0m,15). Dans les locaux humides, un espace d'air doit être laissé entre les conducteurs et les tuyaux qu'ils croisent et les conducteurs doivent être placés de manière qu'ils ne puissent entrer accidentellement en contact avec le tuyau. Les fils seront placés au-dessus des tuyaux sur lesquels peut se condenser l'humidité ou qui, à cause des pertes, pourraient causer des déran-

gements à un circuit. Dans les brasseries, étables, teintureries, moulins à papier et à pulpe ou autres établissements, sujets à l'humidité, tous les conducteurs, excepté où ils sont employés aux suspensions, doivent être : 1° séparés d'au moins six pouces ($0^m,15$) ; 2° posés avec soin et portés par des isolateurs de verre ou porcelaine. Des tuyaux imperméables à l'humidité et non inflammables peuvent être acceptés au lieu de cette disposition. Dans ces locaux on n'admet pas les commutateurs ni les coupe-circuits fusibles.

Les *conduites intérieures* ne peuvent être : 1° combustibles ; 2° d'une matière qui puisse être détériorée ou détruite par le plâtre ou le ciment, ou d'une matière qui puisse détériorer l'isolement du conducteur, ou d'une fabrication telle que l'isolement du conducteur puisse être compromis ou détruit ultérieurement par les éléments de la composition des conduites ; 3° construites et établies de façon qu'on ait de la difficulté à enlever ou à replacer les conducteurs ; 4° sujettes à une détérioration mécanique par la scie, les ciseaux ou les clous ; 5° formées d'un conducteur jumelé dans un simple tube là où on peut atteindre un courant de plus de dix ampères ; 6° on ne peut compter sur elles seules pour l'isolement. Les conducteurs doivent être couverts d'une matière imperméable à l'humidité. Le but du tube ou de la conduite est de faciliter l'insertion ou l'enlèvement des conducteurs, de les protéger contre les détériorations mécaniques et, autant que possible, de l'humidité. Dans les tubes, les conducteurs jumeaux ne peuvent être séparés l'un de l'autre par du caoutchouc ou autre matière semblable, mais par du coton ou autre substance vivement carbonisable. Les conducteurs traversant des murs ou plafonds doivent être

enfermés dans un tubage convenable qui doit émerger d'au moins un pouce au delà de la surface jusqu'à ce que le mortier ou autre enduit semblable soit entièrement sec, moment à partir duquel la saillie peut être réduite à un demi-pouce ($0^m,0125$).

Les coupe-circuits de sûreté à double pôle doivent être : 1° établis là où les conducteurs aériens ou souterrains entrent dans un bâtiment et rejoignent les fils intérieurs ; 2° établis à chacun des endroits où il y a une modification du diamètre du fil (à moins que le coupe-circuit dans le plus gros fil protège le plus mince). Ceci comprend tous les conducteurs flexibles. Toutes ces jonctions doivent être en pleine vue ; 3° montés sur des socles de matière incombustible et imperméable à l'humidité ; 4° construits et placés de façon qu'un arc ne puisse s'établir entre les extrémités à cause de la fusion du métal ; 5° établis de telle sorte que dans toute combinaison aucun groupe de lampes exigeant un courant de six ampères ou davantage ne puisse être définitivement dépendant d'un seul coupe-circuit ; 6° partout où ils sont employés pour plus de six ampères [ou lorsque l'on n'emploie pas la cheville (plug) ou autre dispositif], pourvus de rubans ou de fils fusibles à surfaces ou pointes de contact de métal plus dur, soudé ou autrement, ayant une liaison électrique parfaite avec la partie fusible du ruban.

Les fusées de sûreté doivent être proportionnées aux conducteurs qu'elles doivent protéger, de façon qu'elles fondent avant que le maximum de sécurité de la capacité conductrice du fil soit dépassé. Toutes les fusées, si cela est possible, doivent porter en estampille ou autrement, la marque du nombre d'ampères égal à la capacité conductrice de sûreté du fil qu'elles protègent.

Tous les blocs de coupe-circuit doivent être marqués de même lors de leur installation. La capacité conductrice de sûreté d'un fil change selon différentes circonstances ; elle est d'environ 40 pour cent moindre quand le fil est placé dans un tube ou dans une partie de moulure que lorsqu'il est nu et exposé à l'air, lorsque la chaleur est augmentée subitement. On doit comprendre clairement que le diamètre de la fusée dépend du diamètre du plus petit conducteur qu'elle protège et non de la quantité du courant à employer sur le circuit. Ci-dessous un tableau indiquant la capacité conductrice de sûreté des conducteurs de différents diamètres des jauges de Birmingham, Brown, Sharpe et Edison, tableau qui doit être appliqué pour le placement des conducteurs intérieurs.

BROWN ET SHARPE		BIRMINGHAM		ÉTALON EDISON	
Jauge	Ampères	Jauge	Ampères	Jauge	Ampères
N° 0000	175	N° 0000	175	N° 200	175
000	145	000	150	180	160
00	120	00	130	140	135
0	100	0	110	110	110
1	95	1	95	90	95
2	70	2	85	80	85
3	60	3	75	65	75
4	50	4	65	55	65
5	45	5	60	50	60
6	35	6	50	40	50
7	30	7	45	30	40
8	24	8	35	25	35
10	20	10	30	20	30
12	15	12	20	12	20
14	10	14	15	8	15
16	5	16	10	5	10
		18	5	3	5

Les commutateurs doivent : 1° être montés sur des socles imperméables à l'humidité et incombustibles, tels que ceux en ardoise ou en porcelaine ; 2° être à double pôle lorsque les circuits qu'ils contrôlent sont

reliés à des supports attachés à des tuyaux à gaz et lorsque six ampères ou davantage doivent les traverser; 3° avoir un contact intime et sûr, doivent ouvrir et fermer vivement et ne pas s'arrêter lorsque le mouvement a été donné à la poignée; 4° avoir une capacité conductrice suffisante pour prévoir l'échauffement à un degré supérieur à celui de l'atmosphère environnante; 5° être placé dans des locaux secs et accessibles, et être groupés, autant que possible et montés, lorsqu'il y a moyen, sur des supports d'ardoise ou autre matière également indestructible.

Moteurs. — En plaçant les fils pour la force motrice, les mêmes précautions doivent être prises que pour un courant de même volume et de même potentiel destiné à l'éclairage. Le moteur et la boîte de résistance doivent être protégés par un coupe-circuit à double pôle et commandés par un commutateur à double pôle.

Les lampes à arc sur les circuits à bas potentiel doivent être : 1° desservies par des conducteurs d'embranchement pas plus mince que le n° 12 de la jauge B et S; 2° reliées aux conducteurs principaux seulement au moyen du coupe-circuit à double pôle; 3° pourvues de résistances ou régulateurs qui soient enveloppées d'une matière incombustible, ces résistances étant traitées comme des sources de chaleur; 4° pourvues de globes protégés de la manière indiquée pour les lumières à arc sur les circuits à haut potentiel.

Objets d'appareillage.

1° Dans tous les cas où les conducteurs sont cachés dans les suspensions ou attaches, ou fixés à ceux-ci, les objets d'appareillage doivent être isolés des tuyaux à gaz du bâtiment; 2° lorsqu'ils sont posés à l'exté-

rieur, les conducteurs doivent être établis de telle façon qu'ils ne puissent être coupés ou détériorés par la pression des attaches ou par le mouvement des appareils ; 3° tous les conducteurs pour appareils doivent avoir un isolant imperméable à l'eau, durable et difficilement susceptible de dégradation et ne peuvent, en aucun cas, être plus minces que le n° 16 B et S, n° 18 B. W. G. ou n° 3 E. S. G ; 4° toutes les rugosités ou ébarbures doivent être enlevées avant que les conducteurs soient tirés dans les appareils ; 5° la tendance à la condensation à l'intérieur des tuyaux doit être prévenue par le bouchage du bout supérieur de l'appareil ; 6° on n'admettra aucun appareil dans lequel les conducteurs sont cachés dans un espace moindre que un quart de pouce (0m,006) entre le tuyau intérieur et l'enveloppe extérieure ; 7° chaque appareil devra être essayé sous le rapport des contacts possibles entre les conducteurs et l'appareil et des courts-circuits, avant que l'appareil soit relié aux conducteurs qui l'alimentent ; 8° les blocs d'attaches des appareils aux plafonds seront d'une matière isolante.

Éclairage au gaz.

Là où l'on emploie l'éclairage au gaz sur les mêmes appareils que la lumière électrique : 1° aucune partie des tuyaux à gaz ou des appareils d'éclairage ne sera en liaison électrique avec le circuit de l'éclairage au gaz ; 2° les fils employés avec l'appareil doivent avoir un isolant non inflammable ; là où ils sont cachés entre le tuyau et l'enveloppe de l'appareil, l'isolant doit être le même que celui requis pour les fils d'objets d'appareillage pour l'éclairage électrique ; 3° l'installation entière doit être trouvée, à l'essai, exempte de « terres » ;

4° les deux installations doivent être parfaitement exemptes de liaisons entre elles.

Suspensions et supports (Sockets).

Aucune partie de l'applique des lampes exposées au contact d'objets extérieurs ne peut être en contact électrique avec aucun des conducteurs.

Les suspensions à cordes doivent être : 1° composées de conducteurs dont chacun est formé de plusieurs torons isolés de l'autre conducteur par une séparation mécanique de matière carbonisable et entourés tous deux, dans les locaux humides, d'une couche de matière imperméable à l'humidité et non inflammable ; 2° protégées par un bouchage isolant à l'endroit où la corde entre dans le « socket » ; 3° suspendues de telle façon que le poids total du « socket » et de la lampe soit supporté par des nœuds, au-dessus du point où la corde passe à travers le bloc de plafond ou la rosace, afin que l'effort puisse être pris à partir des vis de jointure.

Tous les « sockets » employés pour les suspensions à corde ou à fil doivent avoir des ouvertures au moins égales à celle d'un tuyau à gaz d'un quart de pouce ; 4° ne peuvent être admis à soutenir rien de plus lourd qu'un lustre de quatre lumières et dans ce cas on prendra la précaution d'ajouter une corde ou un fil extrêmement solide ; 5° pourvues de « sockets » sans clef autant que possible, contrôlés par des commutateurs établis contre le mur. Dans aucun cas une lampe donnant plus de 50 p. 100 ne peut être placée dans un « socket » à clef, sur une suspension flexible.

Toutes les règles relatives aux fils et aux stations, à lumière d'arc seront applicables (pour autant que

cela soit possible), aux stations génératrices pour railways de rues et à leurs conducteurs.

Systèmes de railways avec retour à la terre.

Les systèmes de railways électriques dans lesquels les voitures motrices sont actionnées par un simple fil avec un circuit de retour à la terre sont interdits, excepté ce qui est indiqué ci-après : 1° lorsqu'il est impossible que d'autres conducteurs viennent en contact avec le *fil* portant le chariot de contact (trolley) ; 2° lorsque l'emplacement du générateur est tel que le circuit de terre ne peut créer des chances d'incendie à la propriété ; 3° lorsqu'un coupe-circuit automatique à approuver ou un autre dispositif qui coupe immédiatement le courant dans le cas où les fils « trolley » doit une perte à la terre est introduit dans chaque circuit quand il quitte la station génératrice. Ce dispositif doit être établi sur une base incombustible et en pleine vue du desservant.

Fils « trolley ».

Ces fils doivent être : 1° de dimension au moins égale au n° 0, B et S, cuivre, ou au n° 4, B et S, bronze siliceux, et doivent instantanément supporter l'effort qui leur est imposé lorsqu'ils sont en service ; 2° bien isolés de leurs supports et dans le cas d'une construction *ad hoc*, ou a doubles poteaux, les supports seront également isolés des poteaux immédiatement en dehors du fil « trolley » ; 3° susceptibles d'être disjoints à la station génératrice ou d'être divisés en sections, de façon que, dans le cas d'un incendie sur la route du railway, le courant puisse être coupé sur la section spéciale et ne pas entraver le travail des pompiers dans l'extinc-

tion des flammes. Cette règle s'applique également aux alimentateurs (feeders) ; 4° protégés sûrement contre tout contact avec tous autres conducteurs.

Classe D. — Systèmes alternatifs.

Transformateurs.

Les transformateurs ne peuvent : 1° être placés à l'intérieur d'aucun bâtiment autre que la station centrale, excepté ce qui est prévu ci-après ; 2° être placés dans d'autres caisses que des caisses métalliques ou non combustibles ; 3° être attachés aux murs extérieurs des bâtiments à moins d'en être séparés par des supports isolants substantiels ; 4° être placés ailleurs que dans un endroit sec et convenable (qui peut être obtenu au moyen d'une ouverture dans l'intérieur du bâtiment, telle qu'une voûte), lorsqu'on emploie le système souterrain ; être établis sans fusées de sûreté à la jonction entre les fils principaux et les conducteurs de service et des fusées de sûreté dans les circuits secondaires où ils ne soient pas affectés par la chaleur du transformateur.

Conducteurs primaires.

Dans les cas où il ne serait pas possible d'exclure complètement du bâtiment les transformateurs et les fils primaires, les précautions suivantes doivent être strictement observées : 1° le transformateur doit être établi à un endroit aussi rapproché que possible de celui où les fils primaires entrent dans le bâtiment ; 2° entre ces points, les conducteurs doivent être fortement isolés au moyen d'une enveloppe de matière

imperméable à l'humidité et, en outre, doivent être couverts et protégés de telle façon que toute dégradation mécanique aux conducteurs ou tout contact entre eux soient pratiquement impossibles ; 3° les conducteurs primaires, s'ils sont à l'intérieur d'un bâtiment, doivent être pourvus d'un commutateur à double pôle et, en outre, d'un coupe-circuit automatique à double pôle là où les fils entrent dans le bâtiment ou là où ils quittent la ligne principale, sur le poteau ou dans la conduite. Ces switchs devront, si c'est possible, être enfermés dans des boîtes solides et incombustibles à l'extérieur du bâtiment ; 4° les conducteurs primaires, à l'intérieur du bâtiment, doivent être séparés les uns des autres d'au moins dix pouces ($0^{m},25$) et se trouver à la même distance de tout autre corps conducteur.

Conducteurs secondaires.

Les conducteurs, depuis la bobine secondaire du transformateur jusqu'aux lampes ou autres dispositifs de conversion, doivent être installés selon les règles indiquées pour les fils intérieurs des systèmes à bas potentiel.

Classe E. — Railways électriques.

Stations génératrices.

Fils de voitures.

Tous les fils dans les voitures doivent être établis hors de l'atteinte des voyageurs et isolés au moyen d'une matière imperméable à l'eau.

Fils d'éclairage et de railways.

Les fils d'éclairage et les fils d'énergie ne seront pas admis dans le même circuit que les fils « trolley » avec retour à la terre. La même dynamo peut être employée aux deux usages, pourvu que la connexion de la dynamo pour chaque circuit soit constituée par un commutateur à double pôle disposé de façon qu'un seul des circuits puisse être en service à la fois.

Classe F. — Piles.

Lorsque le courant pour la lumière ou l'énergie est fourni par des piles primaires ou secondaires, les mêmes règles générales doivent être observées que celles qui s'appliquent à ces fils alimentés par des générateurs dynamo développant la même différence de potentiel.

Classe G. — Divers.

1° Les fils dans tout bâtiment doivent être exempts de terres avant l'émission du courant. L'essai sous ce rapport peut être effectué au moyen d'une sonnerie magnéto, qui fonctionne à travers une résistance de 20.000 ohms lorsque des courants de moins de 250 volts sont employés ; 2° aucun fil de terre de paratonnerre ne peut être attaché aux tuyaux de gaz dans le bâtiment ; 3° tous les conducteurs reliés à des téléphones, des appareils des messagers de district, des sonneries d'alarme contre le vol, des horloges électriques et autres appareils semblables doivent, si en une partie quelconque de leur développement, ils sont susceptibles de se croiser avec des circuits por-

tant des courants pour lumière ou énergie, être pourvus, près du point d'entrée dans le bâtiment, d'un dispositif protecteur qui shuntera les appareils dans le cas d'un surélèvement dangereux du potentiel, ouvrir le circuit et arrêtera un flux de courant anormal. Tout conducteur qui forme normalement un circuit non nuisible peut devenir une source de risque d'incendie s'il est croisé par un autre conducteur qui peut à un certain moment porter un courant d'une tension relativement élevée.

Certaines questions ont été posées au comité, celui-ci les considère comme trop importantes pour être décidées en ce moment. Parmi ces questions figurent celles relatives : à la mise sur terre du fil neutre dans le système à compensation ou à trois fils ; à la mise sur terre soit d'une façon permanante, soit par des coupe-circuits automatiques, des fils secondaires dans les systèmes à transformateurs ; à l'adoption d'un alliage uniforme pour les coupe-circuits fusibles et l'adoption des méthodes meilleures d'essais des circuits.

CHRONIQUE.

Ligne téléphonique de New-York à Chicago.

Longue de 1.520 kilomètres, cette ligne, d'une construction très soignée, vient d'être inaugurée et fonctionne très bien. Le fil employé, en cuivre étiré à froid, pèse près de 122 kilogrammes par kilomètre, soit environ 371.925 kilogrammes de cuivre pour l'ensemble du circuit ; on a soigneusement évité l'emploi des câbles si nuisibles à la transmission, et les conducteurs de cette nature ne représentent guère qu'un kilomètre de la ligne dans le trajet des deux villes terminus.

La ligne est donc formée de conducteurs aériens placés sur poteaux et, par conséquent, exposée aux avaries provenant du verglas et des cyclones, aussi a-t-on placé une station de surveillance tous les 112 kilomètres. La construction en a coûté fort cher : en ajoutant au prix du cuivre, qui est de 629.875 francs, le prix de 42.750 poteaux et les salaires, on trouve une somme de 1.900.000 francs environ, soit 1.250 francs par kilomètre.

La taxe de la conversation a été fixée à 45 francs pour cinq minutes.

(*Sciences et commerce*, 29 novembre 1892.)

Sur l'égalité des vitesses de propagation de l'ondulation électrique dans l'air et le long des fils conducteurs, vérifiée par l'emploi d'une grande surface métallique.

Note de MM. L. Sarrasin et L. de la Rive.

Dans une première série de recherches sur la propagation des ondes électriques hertziennes à travers l'air, nous étions

arrivés à la conclusion que la vitesse de propagation de ces ondes dans l'air est sensiblement la même que celle avec laquelle elles se transmettent le long des fils conducteurs. La belle expérience de Hertz, que nous nous étions bornés à reproduire dans des conditions presque identiques à celles qu'il a décrites, consiste, on le sait, à faire arriver les ondulations électriques normalement sur une grande surface métallique plane, et à observer, à l'aide d'un résonnateur circulaire, transporté le long de la normale au centre du miroir, les interférences de l'onde directe et de l'onde réfléchie. La paroi métallique faisant l'office de miroir, dans ces premières recherches, avait presque les mêmes dimensions que la paroi employée par M. Hertz lui-même, soit 2m,80 sur 3 mètres, trop petites cependant pour permettre l'observation de plus d'un nœud en avant du miroir, avec des résonnateurs de 50 centimètres de diamètre et au-dessus.

Nous avons agrandi notre miroir autant que le permettaient les dimensions de notre laboratoire, en portant sa largeur à 5 mètres. Nous avons ainsi amélioré les conditions de l'expérience pour des petits cercles de 35 centimètres et au-dessous; mais nous n'avons pas gagné grand'chose pour les plus grands.

La démonstration expérimentale de l'égalité des deux vitesses dans l'air et le long des fils n'était donc pas tout à fait suffisante pour de grandes longueurs d'onde, et il était désirable, comme l'a dit M. Hertz lui-même, qu'elle fût faite d'une manière définitive, par des expériences à beaucoup plus grande échelle, avec un miroir de 75 centimètres, l'observation de plusieurs ventres et nœuds d'interférence. Ce sont ces conditions que nous avons réalisées de notre mieux, dans la nouvelle série de recherches que nous avons l'honneur de présenter aujourd'hui à l'Académie.

La difficulté était de trouver un local suffisamment grand : nous avons pu l'obtenir grâce à l'obligeance de l'administration de la ville de Genève, qui a mis à notre disposition un espace, libre encore, dans la grande halle où sont installées les turbines des forces motrices de Genève.

Nous avons fait monter contre un des murs du bâtiment une grande paroi métallique, de 8 mètres de haut sur

16 mètres de large, formée de feuilles de zinc de 2 mètres sur 1 mètre clouées les unes aux autres à recouvrement sur un châssis en bois. Pour permettre l'observation des étincelles secondaires le long de la normale au centre de ce miroir, c'est-à-dire à 4 mètres de hauteur, nous avons fait établir en avant de celui-ci un pont de 10 mètres de long et $1^m,50$ de large, supporté sur trois chevalets et surmonté d'une construction légère en lattes recouvertes de papier noir, formant un couloir complètement obscur. Dans cette chambre noire est placé le banc d'optique en bois, précédemment décrit, dont la longueur a été portée à 9 mètres et le long duquel se déplacent les résonnateurs, ayant leur centre constamment sur la normale au milieu du miroir. Le conducteur primaire est disposé, à 15 mètres de distance du miroir, sur un support élevé et en face du centre du miroir. Il est formé, comme précédemment, par deux tiges en laiton de 7 millimètres d'épaisseur, reliant deux sphères de 30 centimètres de diamètre.

Le nouveau dispositif que nous avons précédemment adopté pour cet oscillateur, et qui consiste à produire l'étincelle primaire dans l'huile au lieu de l'air, a notablement facilité cette expérience en augmentant beaucoup, comme nous l'avons dit, l'intensité de l'étincelle secondaire soit comme éclat, soit comme longueur, et en permettant par ce fait des mesures micrométriques de la distance explosive. Les résonnateurs avec lesquels nous avons successivement opéré étant munis chacun d'une vis micrométrique, dont le pas est de 1/4 de millimètre et qui porte un cercle en bois divisé en vingt-cinq parties, nous pouvons lire directement le 1/100 de millimètre. Nous mesurons de la sorte, à intervalles égaux, à partir du miroir, la grandeur qu'il faut donner à l'interrupteur du micromètre pour que l'étincelle cesse complètement de se produire.

Ces deux cercles, qui ne nous avaient présenté que des résultats insuffisants avec les miroirs de 3 et de 5 mètres, et sur lesquels, à cause de cela, nous avons surtout fait porter nos nouvelles recherches, nous ont donné, avec le grand miroir de 16 mètres, des résultats tout à fait comparables aux résultats obtenus avec des cercles plus petits dans nos

expériences antérieures. Nous avons déduit la longueur d'onde correspondant à chaque résonnateur soit de l'observation des ventres et des nœuds dans les deux positions principales du cercle parallèle au miroir (dans le plan de l'onde) ou horizontal (dans le plan de vibration), soit du tracé de la courbe des intensités croissante et décroissante des étincelles secondaires.

La question d'égalité de vitesse dans l'air et dans les fils nous paraît définitivement tranchée par l'emploi du miroir à grandes dimensions. Le cercle de $0^m,50$ nous a, en effet, donné trois ventres et trois nœuds très nets; le cercle de $0^m,75$, trois ventres et deux nœuds également nets; les moyennes des nombreuses mesures donnent très approximativement, pour ces deux cercles :

	1er ventre.	1er nœud.	2e ventre.	2e nœud.	3e ventre.	3e nœud.
Cercle de 50^{cm}.	1^m	2^m	3^m	4^m	5^m	6^m
Cercle de 75^{cm}.	$1^m,50$	3^m	$4^m,50$	6^m	$7^m,58$	»

ce qui représente des internœuds identiques à ceux que nous avions obtenus pour les mêmes cercles le long des fils. Ainsi se trouvent pleinement confirmées, pour les grandes longueurs d'onde aussi, les conclusions auxquelles nous étions arrivés dans nos premières recherches.

Le résonnateur circulaire a une longueur d'onde constante quelles que soient les dimensions de l'oscillateur; l'intensité de l'oscillation seule varie.

Le quart de la longueur d'onde d'un résonnateur circulaire est très approximativement égal au double de son diamètre.

Dans le cas de la réflexion normale le premier nœud est exactement au miroir.

Enfin, comme résultat principal :

La vitesse de propagation de l'ondulation électrique est la même dans l'air et le long des fils conducteurs.

(*Comptes rendus.*)

Sur un four électrique.

Note de MM. Henry Moisson et Jules Violle.

Ce four se compose essentiellement d'une enceinte en charbon, à l'intérieur de laquelle l'arc électrique jaillit entre



deux électrodes horizontales. Cette enceinte a la forme d'un cylindre dont la hauteur égale le diamètre. Elle est constituée par un morceau de tube de charbon, qui repose par son extrémité inférieure sur une plaque de même substance. La partie supérieure supporte un disque de charbon ayant le même diamètre. Enfin, deux échancrures laissent passer les électrodes. Ce cylindre est placé dans un bloc de pierre calcaire, il en est séparé par une couche d'air de 5 millimètres d'épaisseur, et sa base repose sur des cales en magnésie.

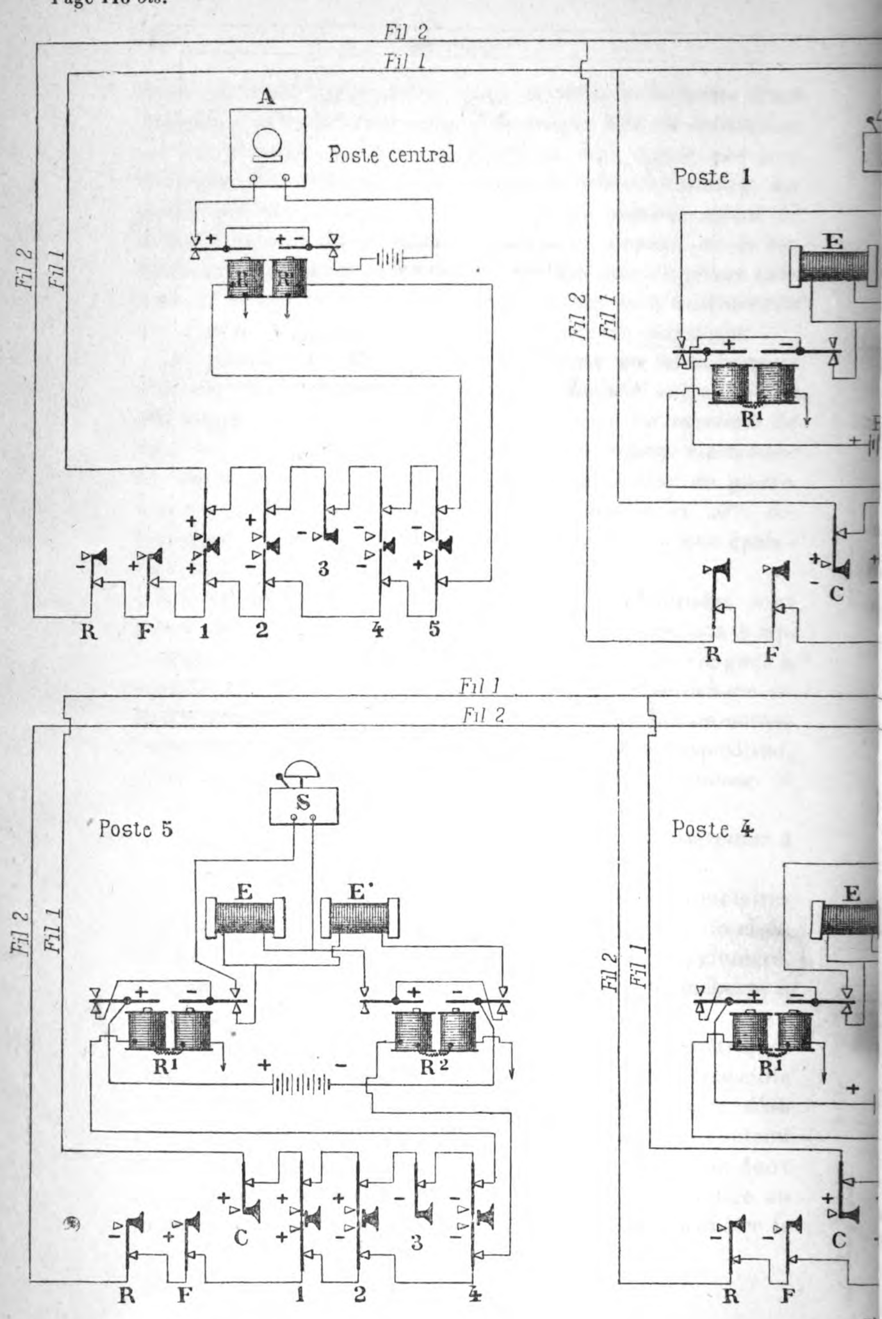
Les dimensions de l'appareil dépendent de la puissance dont on dispose. Pour des courants compris entre 300 et 500 ampères, nous formons l'enceinte avec un morceau de tube de $6^{cm},5$ de diamètre. Nous prenons comme électrodes des charbons de 3^{cm} à $3^{cm},5$ de diamètre, et le bloc de pierre à environ 20^{cm} de hauteur, $2^{cm},5$ de largeur et 30^{cm} de longueur. Le couvercle, qui a la même surface, a une épaisseur de 4 à 5^{cm}.

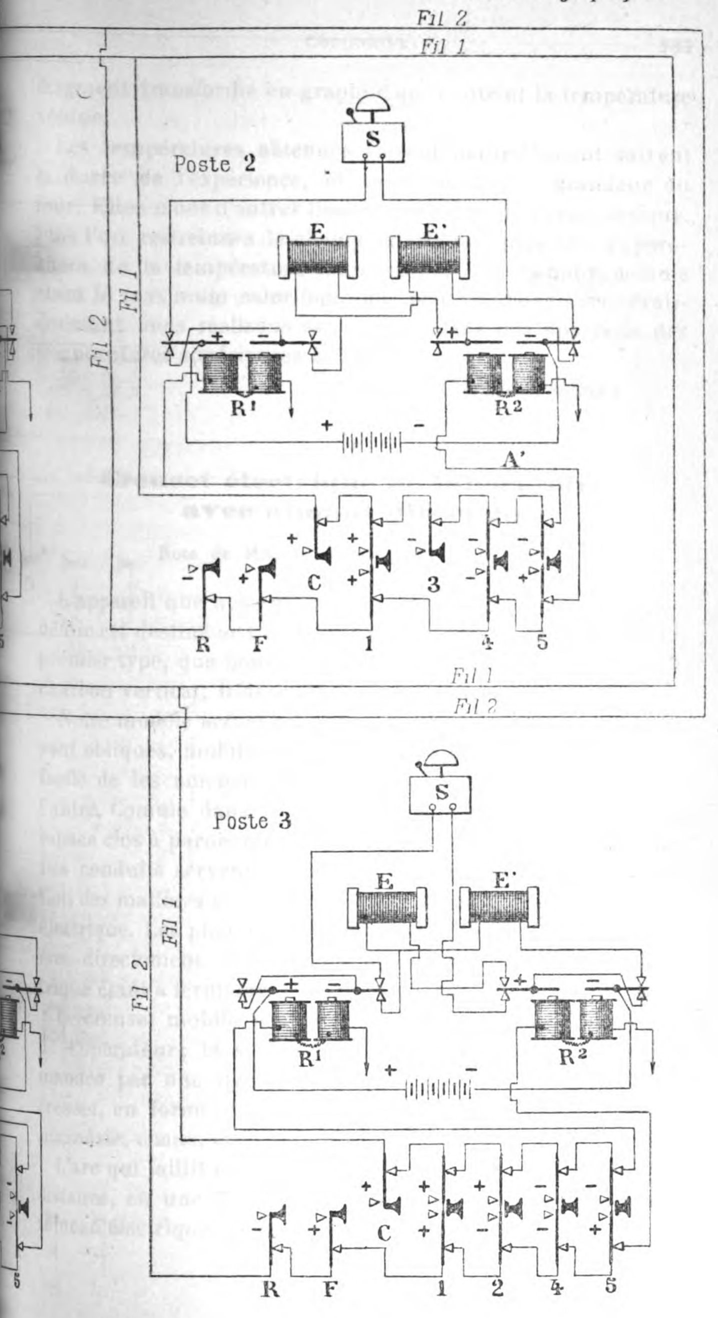
Les cylindres de charbon qui servent d'électrodes sont portés par des pinces en fer reposant sur des chariots horizontaux permettant de les rapprocher ou de les éloigner à volonté. Ils reçoivent le courant par de forts manchons de cuivre rouge armés de mâchoires entre lesquelles on écrase les extrémités du câble dynamo-électrique. Cette disposition, imaginée par M. Tresca, est très commode pour l'allumage et le maniement de l'arc.

Les deux modèles que nous avons l'honneur de présenter à l'Académie sont construits dans ces conditions.

Le premier convient à la fusion des métaux réfractaires tels que le chrome et le manganèse; il contient au fond du cylindre un creuset de charbon qui est fait soit en aggloméré, soit en charbon de cornue, et qui renferme le mélange à réduire.

Le deuxième est destiné aux recherches calorimétriques servant à établir la température de l'arc. Le fond de l'enceinte est alors fermé par une plaque mobile à la manière d'un tiroir. Au pôle positif est un fragment de charbon soutenu par une tige de même substance glissant à frottement doux dans un tube de charbon. On n'a qu'à tirer sur la tige au moment convenable pour faire tomber dans le calorimètre le


Fil 2
Fil 1
A
Poste central
Poste 1
E
R¹
R F 1 2 3 4 5
C
Poste 5
S
E
E'
R¹
R²
Poste 4
Fi


Fil 2
Fil 1
S
Poste 2
E
E'
Fil 1
Fil 2
R¹
R²
A'
C
3
R
F
1
4
5
Fil 1
Fil 2
S
Poste 3
E
E'
Fil 1
Fil 2
R¹
R²
C
R
F
1
2
4
5

fragment transformé en graphite qui a atteint la température voulue.

Les températures obtenues varient naturellement suivant la durée de l'expérience, et aussi suivant la grandeur du four. Elles n'ont d'autres limites que celles de l'arc voltaïque. Plus l'on restreindra le champ calorifique, plus l'on s'approchera de la température indiquée par l'un de nous, comme étant le maximum calorifique que peut produire l'arc. Pratiquement nous réalisons sans peine, dans nos appareils, des températures supérieures à 3.000°.

(*Comptes rendus.*)

Creuset électrique de laboratoire, avec aimant directeur.

Note de MM. E. Ducretet et L. Lejeune.

L'appareil que nous avons l'honneur de présenter à l'Académie est destiné aux recherches et essais de laboratoire. Le premier type, que nous avons fait connaître en 1892, était à charbon vertical; il dérivait du four électrique de Siemens.

Notre modèle actuel est encore vertical, mais ses charbons sont obliques, mobiles dans leur monture métallique; il est facile de les amener en contact ou de les écarter l'un de l'autre. Comme dans le premier type, l'ensemble forme un espace clos à parois réfractaires, recevant le creuset mobile. Des conduits servent à la circulation des gaz et à l'introduction des matières soumises à l'action électrothermique de l'arc électrique. Les phénomènes de fusion et de réduction peuvent être directement observés, les parois de notre creuset électrique étant à fermetures mobiles garnies de mica.

Le creuset mobile peut être déplacé de l'extérieur, au gré de l'opérateur; la sole sur laquelle il se trouve est commandée par une tige. Suivant les matières à réduire, ce creuset, en forme de coupelle, est en charbon, plombagine, magnésie, chaux, etc., ou bien métallique.

L'arc qui jaillit entre les deux charbons est transformé, à distance, en une flamme allongée formant un véritable chalumeau électrique, par suite de l'action directrice d'un aimant

placé près de l'appareil. On peut ainsi diriger l'arc sur la matière contenue dans le creuset et l'amener graduellement au maximum de température.

Le petit modèle que nous présentons peut supporter, avec des charbons d'un diamètre convenable, un courant de 40 ampères. Avec un courant de 12 ampères et 60 volts, on peut obtenir la réduction d'oxydes et la fusion des métaux les plus réfractaires en quantité plus que suffisante pour leur analyse physique ou spectrale. Toutes les expériences classiques et les essais de laboratoire qui exigent une température élevée peuvent être réalisés avec ce petit appareil.

M. Moissan a montré le parti que les chimistes et les industriels peuvent tirer de la méthode électrothermique.

Récemment, MM. Joly et Vèzes, à l'École normale supérieure, avec notre creuset électrique, ont pu amener à l'état métallique, sans oxydation, le ruthénium et l'osmium, en les soumettant, en vase clos, en présence de gaz convenables, à la température très élevée que donne facilement l'arc électrique (*Comptes rendus*, n° 9, 27 février, et n° 11, 13 mars 1893). Le même appareil, construit en plus grandes dimensions, en employant un courant beaucoup plus intense, permet d'agir sur une masse plus grande de matières. Il convient, dans ce cas, de faire circuler un courant d'eau autour des montures métalliques qui reçoivent les gros charbons; ces montures sont alors munies d'une double enveloppe de circulation.

Il est indispensable d'interposer, entre l'opérateur et le creuset électrique, un large écran en verre fumé, en verres rouges ou en verres colorés de couleurs complémentaires superposées, donnant une teinte neutre; ces écrans arrêtent bien une grande partie des rayons lumineux que l'œil ne peut supporter, mais ils chauffent beaucoup; cet inconvénient est atténué par l'emploi de plaques au gélatinochlore d'argent, avec lesquelles on peut obtenir (suivant le temps d'exposition à la lumière et la durée d'immersion dans le bain développateur) toutes les teintes jusqu'à l'opacité complète.

(*Comptes rendus*.)

Sur la température de l'arc électrique.

Note de M. J. VIOLLE.

I. — J'ai expérimenté sur l'arc électrique produit dans des conditions très variées, depuis 10 ampères et 50 volts jusqu'à 400 ampères et 85 volts, consommant de 500 à 34.000 watts, c'est-à-dire de 0,7 à 46 chevaux-vapeur. Les expériences ont été effectuées au moyen d'une excellente machine à courant continu que m'a gracieusement prêtée la compagnie Edison.

M. Tresca m'a aidé avec son habileté et son obligeance bien connues; je lui en suis d'autant plus reconnaissant qu'aux puissances que nous avons atteintes les expériences deviennent très pénibles : on ne sait plus comment préserver le visage et principalement les yeux.

Cependant, et c'est là le premier fait sur lequel je me permets d'appeler l'attention de l'Académie, surtout à cause de l'étendue des limites dans lesquelles j'ai opéré, l'intensité intrinsèque, l'éclat de la plage positive est identiquement le même pour ces arcs de puissances si différentes. Les mesures que j'ai prises avec mon spectrophotomètre en diveres régions du spectre ne laissent aucun doute sur ce point, non plus que les photographies que j'ai obtenues.

Il résulte de là que la température du charbon positif, ainsi que celle des particules de carbone contenues dans l'arc, est constante, quelle que soit la dépense d'énergie. C'est donc la température de volatilisation du carbone.

II. — J'ai entrepris de la mesurer. A cet effet, j'ai produit l'arc à 400 ampères entre deux charbons de grosseur telle que, après cinq ou six minutes de chauffe, l'extrémité positive présentât sur une longueur de près de 1 centimètre l'éclat qui caractérise la température limite. On avait d'ailleurs pratiqué d'avance sur le charbon positif un évidement à 2 centimètres environ de l'extrémité et, quand, par suite de l'usure du charbon, il ne restait plus à cet extrémité qu'un bouton d'éclat homogène, un choc détachait ce bouton et le faisait tomber dans un calorimètre disposé comme pour mes expériences sur les métaux réfractaires. Je rappellerai seulement que le corps chaud tombe dans un petit vase cylindrique en

cuivre placé au milieu de l'eau du calorimètre. J'avais mis au fond de ce vase un disque de graphite; un autre disque était jeté vivement sur le bouton de charbon dès que celui-ci était tombé dans le vase, puis on appliquait sur le vase son couvercle; la chaleur apportée était alors très aisément mesurée suivant le procédé habituel. Avec l'enceinte due à M. Berthelot et un système d'écrans en carton d'amiante, on peut se préserver à peu près complètement du rayonnement de l'arc et, en tous cas, réduire assez la correction provenant de ce fait pour que deux expériences à blanc, exécutées avant et après la mesure, permettent de l'évaluer exactement. La perte de chaleur éprouvée par le bouton dans sa chute est d'ailleurs nécessairement très faible, l'ouverture du petit vase étant amenée à 10 centimètres environ des charbons, et le bouton, grâce au choc, franchissant rapidement ce court espace au milieu de la vapeur de l'arc.

J'ai trouvé ainsi que la quantité de chaleur abandonnée par 1 gramme de charbon, ou, ce qui revient au même, la quantité de chaleur nécessaire pour porter 1 gramme de graphite de 0° à la température de volatilisation du carbone est de 1.000 calories (gramme, degré, centigrade). Or, d'après les expériences de Weber et de Dewar, il faut environ 300 calories pour chauffer 1 gramme de graphite de 0° à 1.000°. Il reste 1.300 calories attribuables à l'échauffement depuis 1.000 jusqu'au point de volatilisation du carbone. Si nous admettons qu'au-dessous de 1.000° la chaleur spécifique du graphite ait une valeur théorique 0,52, ces 1.300 calories représentent 2.500°, de sorte que la température cherchée est 3.500°.

Telle est la température de la partie la plus chaude du charbon positif ainsi que de l'arc, ou la température de volatilisation du carbone. (*Comptes rendus.*)

Le chant du téléphone.

On désigne ainsi un phénomène très curieux que plusieurs expérimentateurs ont déjà signalé, et sur lequel de récentes observations de M. Deckert, de Vienne, attirent plus particulièrement l'attention. Il consiste dans ce fait qu'un téléphone,

placé dans des conditions déterminées, peut, en quelque sorte, entretenir sa propre vibration et faire entendre un son indéfiniment prolongé.

Les dispositions à prendre pour réaliser l'expérience sont très simples en elles-mêmes, ne demandent qu'un peu de soin et de bons appareils : un microphone de grande sensibilité étant mis en court circuit sur sa batterie et le fil primaire de sa bobine d'induction, on place un téléphone, de préférence bipolaire, de construction soignée, en face et à faible distance du microphone. Si, dans ces conditions, on vient, en soufflant ou en sifflant, à ébranler la couche d'air qui sépare les deux appareils, le récepteur téléphonique rend un son qui pourra ne cesser que lorsque le courant qui actionne le microphone aura pris fin. Le son émis est assez intense et de hauteur variable, selon les appareils utilisés; il persiste lorsqu'on intercale un diaphragme de faible épaisseur; un tube de même diamètre que l'intervalle le renforce, de même que l'adjonction de quelques éléments de pile.

Avec des appareils de précision, le téléphone chante dès qu'on le touche légèrement, ou même parfois spontanément.

On a donné diverses explications de ce phénomène : une l'attribue à l'action du courant dont les variations se traduiraient par des effets calorifiques, puis acoustiques, la fréquence des vibrations allant en s'affaiblissant; une autre en fait une théorie purement acoustique. La plus plausible et la plus complète de ces théories paraît être celle qu'en donne M. A.-W. Lamberg; elle repose sur ce fait connu, que le passage d'un courant constant par un contact imparfait, mobile et élastique, met en vibration le conducteur lui-même, qui produit une sorte de bourdonnement : ce serait le cas du microphone. Pour expliquer le chant du téléphone, M. Lamberg distingue trois périodes : la première impulsion part de la membrane du microphone, dont le mouvement vibratoire est modifié par suite du mouvement de l'atmosphère ambiante; le contact des charbons devient plus parfait et la résistance diminuant, le courant primaire acquiert plus d'intensité : cela se traduit dans la deuxième période par des courants induits qui influencent le magnétisme du téléphone; enfin le troisième terme de cette série est le phénomène acoustique de la vibration de la

colonne d'air qui se trouve entre les diaphragmes des deux appareils.

Entre ces trois moments il s'exercerait une action réciproque, analogue à celle qui se produit entre le système inducteur et l'induit d'une dynamo qui s'amorce et qui tendrait à renforcer le phénomène jusqu'à son maximum d'intensité.

Quoi qu'il en soit de l'exactitude de ces causes, le chant du téléphone, ainsi provoqué par le seul rapprochement convenable des deux principaux organes téléphoniques, serait susceptible d'être transmis à distance et deviendrait le sujet d'applications nouvelles très intéressantes, dont quelques-unes sont déjà brevetées.

(*Industrie électrique.*)

Les chemins de fer électriques.

On parle de temps en temps d'un chemin de fer électrique entre Vienne et Budapest. Le projet avait été présenté par M. Charles Zipernowsky au congrès des électriciens, à Francfort, en 1891. L'exécution se fera sans doute attendre longtemps. M. Kœstler a calculé que les dépenses pour cette voie, qui aurait 240 kilomètres de longueur, s'élèveraient, si l'on suivait le programme de M. Zipernowsky, à 300 ou 350 millions de francs. On estime que le nombre des voyageurs entre Vienne et Budapest s'élève annuellement à 200.000. Des trains électriques rapides augmenteraient certainement beaucoup la circulation. Mais il serait difficile de retrouver les intérêts du capital de premier établissement.

— On construit et on doit essayer prochainement sur les chemins de fer de l'État en France une locomotive électrique, qui comportera comme éléments principaux une chaudière du système Lentz, une machine à vapeur Brown donnant le courant à des moteurs électriques montés sur les essieux par l'intermédiaire d'une suspension élastique. L'expérience sera assurément des plus intéressantes.

(*Bulletin international de l'électricité.*)

Gérant : Ve DUNOD. — PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

ANNALES

TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1893 Mai-Juin

SUR LES RELATIONS GÉNÉRALES QUI EXISTENT ENTRE LES COEFFICIENTS DES LOIS FONDAMENTALES DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME ET LES CONSÉQUENCES QUI EN RÉSULTENT AU POINT DE VUE DES DIMENSIONS ET DES UNITÉS ÉLECTRIQUES (*)

I

Considérons dans l'ordre historique les lois fondamentales suivantes de l'électricité et du magnétisme :

$$(1)\quad f = k\frac{qq'}{r^2};\qquad (3)\quad f = a\,\frac{ii'\,ds\,ds'}{r^2}(2\cos\theta - 3\cos\alpha\cos\alpha');$$

$$(2)\quad f = k'\frac{\mu\mu'}{r^2};\qquad (4)\quad f = \lambda\,\frac{\mu i\,ds\sin\alpha}{r^2}.$$

Les deux premières ont été trouvées par Coulomb à la fin du siècle dernier en étudiant les actions électrostatiques et magnétiques ; les coefficients k et k' qu'elles renferment doivent être considérés comme caracté-

(*) *Comptes rendus de l'Académie des sciences* des 17, 24 avril et 31 mai 1893.



ristiques des milieux où se produisent les actions, et doivent être conservés dans toutes les formules d'électrostatique et de magnétisme, tant que leur nature physique n'est pas bien déterminée.

Supposons que les quantités d'électricité et de magnétisme représentées dans (1) et (2) par q et μ soient exprimables en fonction des unités fondamentales de la mécanique (unité de longueur L (*), de masse M, de temps T), ainsi que les coefficients k et k', dont nous représenterons les unités par K et K'.

Alors si nous désignons par n et n' (*) des nombres, on peut écrire la *définition en dimensions* des quantités q et μ de la façon suivante :

$$q = n\,\mathsf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathsf{M}^{\frac{1}{2}}\mathsf{L}^{\frac{3}{2}}\mathsf{T}^{-1} = n\,\mathsf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathsf{L}\sqrt{\mathsf{F}}, \tag{5}$$

$$\mu = n'\,\mathsf{K}'^{-\frac{1}{2}}\mathsf{M}^{\frac{1}{2}}\mathsf{L}^{\frac{2}{3}}\mathsf{T}^{-1} = n'\,\mathsf{K}'^{-\frac{1}{2}}\mathsf{L}\sqrt{\mathsf{F}}, \tag{6}$$

F représentant l'unité de force.

On en déduit, d'après les *définitions* connues, les expressions en dimensions des diverses quantités électriques et magnétiques, par exemple le potentiel V et la capacité C :

$$\text{(7)}\quad \mathrm{V} = n\,\mathsf{K}^{\frac{1}{2}}\sqrt{\mathsf{F}}, \qquad\qquad \text{(8)}\quad \mathrm{C} = n\,\mathsf{K}^{-1}\mathsf{L}\ldots, \text{ etc.}$$

La découverte de la pile et des effets de l'électricité en mouvement n'introduisirent dans les formules expri-

(*) Dans ce qui va suivre, on représentera toujours *l'unité* d'une quantité par l'initiale de son nom en caractères antiques, au lieu d'employer, comme on le fait depuis Maxwell, des lettres capitales entourées de crochets, [M], par exemple. Ces crochets sont très gênants dans les formules et les calculs de dimensions : l'emploi des caractères antiques, qui ne surcharge pas les formules et qui permet de distinguer sans ambiguïté les lettres qui représentent les unités, des mêmes lettres ayant une autre signification, nous semble bien préférable.

Les lettres n ou N avec des accents ou des indices représenteront toujours les mots : *un certain nombre;* leur emploi, en ce sens, permet de conserver aux *équations* leur signification *ordinaire.*

mant ces effets aucun coefficient nouveau semblable à k et k'. L'identité d'action des courants produits par les piles et les machines électriques conduit tout naturellement à définir l'intensité d'un courant par la quantité d'électricité qui passe dans l'unité de temps à travers une section d'un circuit, cette quantité d'électricité étant de la même nature physique que celle qui est représentée en électrostatique par $q = n\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{L}\sqrt{\mathbf{F}}$. D'après cette conception, confirmée plus tard par Faraday, la *définition* de cette intensité i est donc :

$$i = n\frac{q}{t}, \tag{9}$$

ou plutôt

$$i = n\frac{dq}{dt} = n\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{L}\mathbf{T}^{-1}\sqrt{\mathbf{F}},$$

n étant bien un coefficient purement numérique ; on peut dire que c'est la définition de Faraday.

En 1820, l'expérience d'Œrstedt établit un lien entre les courants électriques et les aimants, une relation entre les quantités telles que i et telles que μ ; mais avant que cette relation fût exprimée *sous la forme même* (4) qu'on donna plus tard à la loi de Laplace, Ampère, en découvrant les actions électro-dynamiques et la formule (3) qui en exprime la loi, introduisit un troisième coefficient, que nous représentons par a, caractéristique, comme k et k', du milieu dans lequel se produisent les phénomènes, et dont nous devons laisser la nature indéterminée, nous contentant de représenter son unité par $\mathbf{A}$.

Les intensités i et i' qui entrent dans la loi d'Ampère étant définies par la relation (9), la formule (3), dont toutes les conséquences ont été d'ailleurs vérifiées par l'expérience, *doit être homogène* nécessairement.

En remarquant que l'expression entre parenthèses a des dimensions nulles, que ds, ds', r sont des longueurs, la formule se réduit à :

$$f = naii'.$$

En remplaçant i et i' par leur expression en dimensions, on voit qu'il résulte de l'homogénéité la relation *nécessaire* suivante entre les coefficients k et a :

$$\frac{k}{a} = n \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-2}, \tag{10}$$

relation qu'on peut énoncer ainsi :

I. *Le rapport des coefficients qui entrent dans la loi électrostatique de Coulomb et la loi d'Ampère représente le carré d'une certaine vitesse, à une constante numérique près.*

Considérons maintenant la loi de Laplace sous sa forme complète (4) où l'intensité i du courant est mise en évidence. Cette intensité i étant définie d'après (9), et μ l'étant d'après (6), ds et r étant des longueurs, l'homogénéité de la formule (4) qui peut être prise sous la forme :

$$f = n\lambda \mathbf{K}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{L} \mathbf{T}^{-1} \sqrt{\mathbf{F}} \times \mathbf{K'}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{L} \sqrt{\mathbf{F}} \times \mathbf{L}^{-1},$$

exige entre les coefficients λ, k et k' la relation suivante :

$$\frac{\lambda^2}{kk'} = \frac{n'}{\mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-2}}, \tag{11}$$

c'est-à-dire que :

II. *Le rapport du produit des coefficients des lois électrostatique et magnétique de Coulomb au carré du coefficient de la loi de Laplace, représente le carré d'une vitesse, à une constante numérique près.*

Si l'on rapproche l'une de l'autre les expressions (10)

et (11) on en déduit, en les multipliant l'une par l'autre :

$$\frac{k}{a}\,\frac{\lambda^2}{kk'} = \frac{n}{n'} = \mathrm{N},$$

ou

(12) $$\lambda^2 = \mathrm{N}k'a;$$

d'où ce corollaire des deux propositions précédentes :

Le coefficient de la loi de Laplace est, à un facteur numérique près, la moyenne proportionnelle entre les coefficients de la loi d'Ampère et de la loi magnétique de Coulomb.

Les relations (10), (11) et (12) ont été uniquement déduites de la considération de l'homogénéité des formules exprimant les lois fondamentales; en dehors de cette considération, elles ne s'appuient que sur cette hypothèse que les grandeurs électriques et magnétiques sont susceptibles d'être exprimées en fonction des unités de longueur, temps et masse, comme toutes les grandeurs considérées en mécanique.

Mais, d'autre part, si on examine les expériences et calculs d'où Ampère a conclu l'identité des aimants et de certains systèmes des courants; si, comme cela doit être fait, on laisse dans toutes les formules les coefficients k', λ, a, caractéristiques de l'influence du milieu dans les phénomènes électro-magnétiques, on arrive à ce résultat que l'identification des lois de l'électro-dynamique et de l'électro-magnétisme est complète jusqu'aux valeurs numériques, si les valeurs des coefficients satisfont à la condition :

(13) $$\lambda^2 = k'a.$$

Or c'est précisément la relation (12) ci-dessus dans laquelle le facteur numérique N est égal à l'unité. On peut remarquer : 1° que la relation ci-dessus est indépendante du coefficient k de la loi électrostatique de

Coulomb; 2° qu'elle ne dépend pas de la loi d'Ohm; elle aurait pu être formulée avant la découverte de cette loi.

Cette loi elle-même n'introduit en électro-magnétisme aucun coefficient nouveau analogue à k, k', λ, a. Elle a servi à définir la notion de *résistance* électrique comme étant le rapport constant entre la différence de potentiel qui produit un courant et l'intensité de ce courant.

On en déduit la définition en dimensions de la résistance R d'après (7) et (9).

$$\mathrm{R} = n \frac{\mathbf{K}^{\frac{1}{2}} \sqrt{\mathbf{F}}}{\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\mathbf{F}} \, \mathbf{L} \, \mathbf{T}^{-1}} = n \, \mathbf{K} \, \mathbf{L}^{-1} \, \mathbf{T}. \tag{14}$$

La loi de Joule ne donne pas, au point de vue qui nous occupe, d'autres résultats que ceux de la loi d'Ohm; elle ne donne pas de relation nouvelle entre les coefficients k, k', a, λ.

La découverte de l'induction et les conséquences qu'on en a déduites n'ont introduit aucun nouveau coefficient analogue à k, a, λ, k', qui suffisent pour définir les quantités qui entrent dans les formules d'induction.

En particulier l'*induction mutuelle* M et l'*auto-induction* L s'expriment en dimensions, d'après leur définition physique, quand on laisse dans les formules les coefficients λ, k' ou a, par l'expression :

$$n \frac{\mathbf{\Lambda}^2}{\mathbf{K}'} \mathbf{L} \quad \text{ou bien} \quad n \, \mathbf{A} \, \mathbf{L} \quad \text{d'après (13).} \tag{15}$$

II

On voit, d'après ce qui précède, que de simples considérations d'homogénéité conduisent aux relations

générales suivantes entre les coefficients k, k', a et λ des principales lois de l'électricité.

(10) $\frac{k}{a} = n\mathrm{L}^2\mathrm{T}^{-2}$. (11) $\frac{kk'}{\lambda^2} = n\mathrm{L}^2\mathrm{T}^{-2}$, et (13) $\lambda^2 = k'a$,

conséquences des deux premières.

Ces relations ne préjugent rien sur la nature physique des grandeurs k, k', a et λ : que ce soient des constantes numériques ou des quantités physiques exprimables en longueurs, temps et masses, les relations ci-dessus sont toujours vraies; elles doivent être considérées comme des conséquences *nécessaires* des définitions mêmes des grandeurs électriques et de la *forme* mathématique des lois de Coulomb, d'Ampère et de Laplace.

On peut en déduire quelques conséquences générales.

D'abord il en résulte qu'on peut exprimer en dimensions chaque grandeur électrique de plusieurs manières en fonction de k, ou de a, ou de λ et k', ou de k et a, ou de λ, k et k', par des expressions qui seront, si l'on a égard aux relations ci-dessus, absolument équivalentes, ce qui est indispensable; car une même grandeur ne peut avoir qu'une seule définition physique exprimable d'une seule manière en fonction des unités fondamentales.

On obtient ainsi des systèmes rationnels de dimensions qu'on peut appeler : *système Coulomb* quand les expressions sont en fonction de K ; *système Ampère*, quand elles sont en fonction de A ; *système Laplace*, quand elles sont en fonction de Λ et $\overline{\mathrm{K}'}$ (il est bien entendu qu'il s'agit des *unités de* k, a et λ).

Le tableau suivant donne, dans ces trois systèmes, les expressions des principales grandeurs électriques,

avec les formules de transformation (10), (11) et (13), qui servent à passer d'un système aux autres.

Systèmes rationnels de dimensions des principales grandeurs électriques.

($\mathbf{K}$, $\mathbf{K}'$, $\mathbf{A}$, $\mathbf{\Lambda}$ sont les *unités* des coefficients des lois de Coulomb, d'Ampère et de Laplace)

	Système Coulomb (expressions en fonction de $\mathbf{K}$).	*Système Ampère* (expressions en fonction de $\mathbf{A}$).	*Système Laplace* (expressions en fonction de $\mathbf{\Lambda}$ et $\mathbf{K}'$)
Quantité d'électricité . .	$Q_k = n \frac{1}{\sqrt{\mathbf{K}}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{3}{2}} \mathbf{T}^{-1}$	$Q_a = n \sqrt{\frac{1}{\mathbf{A}}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{1}{2}}$	$Q_\lambda = n \frac{\sqrt{\mathbf{K}'}}{\mathbf{\Lambda}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{1}{2}}$
Potentiel.	$V_k = n \sqrt{\mathbf{K}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{1}{2}} \mathbf{T}^{-1}$	$V_a = n \sqrt{\mathbf{A}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{3}{2}} \mathbf{T}^{-2}$	$V_\lambda = n \frac{\mathbf{\Lambda}}{\sqrt{\mathbf{K}'}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{3}{2}}$
Capacité.	$C_k = n \frac{1}{\mathbf{K}} \mathbf{L}$	$C_a = n \frac{1}{\mathbf{A}} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{T}^2$	$C_\lambda = n \frac{\mathbf{K}'}{\mathbf{\Lambda}^2} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{T}^2$
Intensité de courant. . .	$I_k = n \frac{1}{\sqrt{\mathbf{K}}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{3}{2}} \mathbf{T}^{-2}$	$I_a = n \sqrt{\frac{1}{\mathbf{A}}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{1}{2}} \mathbf{T}^{-1}$	$I_\lambda = n \frac{\sqrt{\mathbf{K}'}}{\mathbf{\Lambda}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{1}{2}}$
Résistance.	$R_k = n \mathbf{K} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{T}$	$R_a = n \mathbf{A} \mathbf{L} \mathbf{T}^{-1}$	$R_\lambda = n \frac{\mathbf{\Lambda}^2}{\mathbf{K}'} \mathbf{L} \mathbf{T}^{-1}$
Auto-induction.	$L_k = n \mathbf{K} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{T}^2$	$L_a = n \mathbf{A} \mathbf{L}$	$L_\lambda = n \frac{\mathbf{\Lambda}^2}{\mathbf{K}'} \mathbf{L}$
Quantité de magnétisme.	»	»	$\mu_\lambda = n \frac{1}{\sqrt{\mathbf{K}'}} \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{L}^{\frac{3}{2}}$.

Systèmes mixtes.

Système Coulomb-Ampère.	Système Coulomb-Laplace.
$Q^2_{ca} = n \frac{1}{\sqrt{\mathbf{A}\mathbf{K}}} \mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-1}$	$Q^2_{c\lambda} = n \frac{\sqrt{\mathbf{K}'}}{\mathbf{\Lambda}\sqrt{\mathbf{K}}} \mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-1}$
$V^2_{ca} = n \sqrt{\mathbf{A}\mathbf{K}} \mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-3}$	$V^2_{c\lambda} = n \frac{\mathbf{\Lambda}\sqrt{\mathbf{K}}}{\sqrt{\mathbf{K}'}} \mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-3}$
$C^2_{ca} = n \frac{1}{\mathbf{A}\mathbf{K}} \mathbf{T}^2$	$C^2_{c\lambda} = n \frac{\mathbf{K}'}{\mathbf{\Lambda}^2 \mathbf{K}} \mathbf{T}^2$
$I^2_{ca} = n \frac{1}{\sqrt{\mathbf{A}\mathbf{K}}} \mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-3}$	$I^2_{c\lambda} = n \frac{\sqrt{\mathbf{K}'}}{\mathbf{\Lambda}\sqrt{\mathbf{K}}} \mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-3}$
$R^2_{ca} = n \mathbf{A}\mathbf{K}$	$R^2_{c\lambda} = n \frac{\mathbf{\Lambda}^2 \mathbf{K}}{\mathbf{K}'}$
$L^2_{ca} = n \mathbf{A}\mathbf{K}\mathbf{T}^2$	$L^2_{c\lambda} = n \frac{\mathbf{\Lambda}^2 \mathbf{K}}{\mathbf{K}'} \mathbf{T}^2$
$\mu^2_{ca} = n \frac{\sqrt{\mathbf{A}\mathbf{K}}}{\mathbf{\Lambda}^2} \mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-1}$	$\mu^2_{c\lambda} = n \frac{\sqrt{\mathbf{K}}}{\mathbf{\Lambda}\sqrt{\mathbf{K}'}} \mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-1}$

Formules de transformation pour passer d'un système aux autres :

$$\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{A}} = \mathbf{L}^2\mathbf{T}^{-2}; \quad \frac{\mathbf{K}\mathbf{K}'}{\mathbf{\Lambda}^2} = \mathbf{L}^2\mathbf{T}^{-2}; \quad \mathbf{\Lambda}^2 = \mathbf{A}\mathbf{K}'.$$

En multipliant deux des expressions d'une même grandeur dans deux systèmes, on obtient deux systèmes *mixtes* renfermant les expressions des carrés des grandeurs considérées, systèmes qu'on peut désigner sous les noms : *Coulomb-Ampère* et *Coulomb-Laplace*.

Ces cinq systèmes sont donnés simplement comme exemples; on ferait aisément à ce sujet une classification complète.

Dans tous les calculs d'homogénéité, on pourra se servir à volonté pour chacune des grandeurs électriques de n'importe laquelle de ses expressions renfermées dans le tableau, sans crainte d'erreur; tous les résultats auxquels on arrivera seront indépendants de la nature physique de k, k', a et λ, et, par suite, tout à fait généraux; on pourra choisir, dans chaque cas, les expressions les plus simples ou les plus commodes pour les calculs.

A la seule inspection de ce tableau, on voit immédiatement des relations curieuses, telles que celles-ci : *le carré d'une résistance représente le produit des coefficients des lois de Coulomb et d'Ampère :*

$$(\mathrm{R}_{ca}^2 = n\mathbf{A}\mathbf{K}),$$

et beaucoup d'autres relations, n'ayant pas servi à constituer les expressions renfermées dans le tableau, relations qui sont déjà connues, mais qui acquièrent, d'après ce qui précède, une généralité complète : soit

que, dans ces combinaisons, les unités des coefficients k, k', a, λ disparaissent, les unités mécaniques restant seules avec un facteur numérique, soit même que les unités elles-mêmes disparaissent, et que le facteur numérique reste seul.

C'est ainsi que, quels que soient k, k', a, λ, on retrouve la loi de Joule, c'est-à-dire que RI^2t représente une énergie $\mathrm{ML^2T^{-2}}$; cette propriété de l'auto-induction, que LI^2 représente une énergie; que l'expression CV^2 représente aussi une énergie; que les expressions CR, $\frac{L}{R}$, $\sqrt{CL}$ représentent un temps $n\mathrm{T}$; que l'expression $\frac{CR^2}{L}$ représente, par suite, une quantité *numérique* n, et ainsi de suite.

On remarquera que les systèmes de dimensions appelés ordinairement *électrostatique* et *électro-magnétique* ne sont pas renfermés dans le tableau. C'est parce qu'ils ne sont pas indépendants de la nature physique des coefficients k, k', a, λ. Dans le premier, on suppose que k est un coefficient purement numérique; dans le second, on suppose que c'est k' et aussi λ, et par suite a d'après la relation (13). Or l'hypothèse qui fait de k un nombre est inadmissible, car les faits les plus simples montrent que le pouvoir inducteur spécifique, k^{-1}, varie avec tous les diélectriques; les autres hypothèses sont beaucoup plus vraisemblables, mais tant qu'on n'aura pas démontré, *sans contestation possible*, quelle est la vraie nature physique de a, k', λ, il est absolument irrationnel de donner aux quantités électriques des dimensions où cette nature est préjugée d'avance.

Dans l'état actuel de la science, le système de dimen-

sions dit *électrostatique* est donc inadmissible; le système *électro-magnétique* est sans doute plus vraisemblable, mais en l'absence de *certitude complète* sur les dimensions des coefficients λ, a, k', il nous semble devoir être rejeté également. Au point de vue des recherches théoriques relatives à l'électricité, l'emploi de ces deux systèmes de *dimensions* n'a produit et ne peut produire que des confusions, des malentendus et même des erreurs.

III

Il peut n'en pas être de même lorsqu'il s'agit, non plus de déterminer les *dimensions* des grandeurs électriques et magnétiques, mais bien le système cohérent et rationnel d'*unités* auxquelles on doit rapporter ces grandeurs pour en obtenir les *valeurs numériques*. Ces deux questions sont tout à fait distinctes; malheureusement, on peut affirmer qu'on les a trop confondues, et même que des nécessités d'ordre en quelque sorte *industriel* ont beaucoup contribué à cette confusion, et ont fini par faire prédominer la question pratique des *unités* sur la question théorique des *dimensions*.

Mais, après avoir montré comment on peut constituer des systèmes d'expressions en dimensions des grandeurs électriques ne présentant rien d'arbitraire, et renfermant les coefficients k, k', a, λ des lois de Coulomb, Ampère et Laplace, il est aisé de voir comment on peut en déduire un système rationnel d'*unités* pour ces grandeurs, en satisfaisant le mieux possible à cette double condition pratique : 1° de simplifier les calculs, en supprimant le plus de coefficients qu'il est pos-

sible; 2° de rendre la réalisation pratique des unités aussi simple et aussi précise qu'on le pourra.

Il faut choisir d'abord le système rationnel de *dimensions* qui permettra de satisfaire à ces deux conditions.

Le système Coulomb, où les grandeurs sont exprimées en fonction de k, doit être tout de suite écarté, car il est inadmissible de considérer k comme un coefficient numérique, puisqu'il varie avec tous les diélectriques, et ce coefficient resterait dans tous les calculs numériques; à moins qu'on ne se bornât à opérer toujours dans le même milieu, l'air par exemple, auquel cas on pourrait sans grand inconvénient supposer $k = 1$, puisqu'il resterait toujours constant; mais cette restriction est inadmissible dans les applications aussi bien qu'en théorie.

Restent les systèmes simples Ampère et Laplace, qui d'ailleurs sont identiques aux coefficients près.

Or ces coefficients a, λ, k' ne paraissent pas présenter à beaucoup près le même degré de variabilité que k.

En effet, nous avons démontré expérimentalement, M. Vaschy et moi (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 8 et 22 janvier 1883; *Annales télégraphiques*, janvier et février 1883), qu'en passant de l'air dans des milieux tels que l'huile, la glycérine, la benzine, le pétrole, tandis que le coefficient k y varie du simple au double, les coefficients a et k' n'y varient pas de 1/300; et il en est de même du coefficient λ d'après la relation $\lambda^2 = ak'$ qui existe entre eux.

Par suite, l'hypothèse que a, λ et k' sont des coefficients numériques, n'étant pas en contradiction avec l'expérience, peut être admise au moins provisoirement, et sous toutes réserves, au sujet des dimensions

qui pourront être attribuées peut-être plus tard à ces coefficients. De là, la justification de l'emploi du système Laplace pour l'expression en dimensions des grandeurs électriques; en considérant, en effet, dans les formules de ce système λ et k' non seulement comme des nombres, mais comme égaux à l'unité, on obtient précisément le système *arbitraire* de dimensions dit *électro-magnétique*.

On voit d'ailleurs qu'on aurait une infinité de systèmes *arbitraires* analogues, en donnant aux coefficients une infinité de valeurs numériques, puisqu'elles ne sont soumises qu'à la condition exprimée par l'équation :

$$\Lambda^2 = AK'.$$

On aurait pu se servir également du système Ampère comme point de départ; mais l'emploi si général, si simple et si précis des galvanomètres et des instruments électro-magnétiques proprement dits, semble devoir faire préférer le système Laplace, et, par suite, le système dit *électro-magnétique* qui en dérive, et dont l'usage ne présente pas d'inconvénients graves, à la condition de ne pas oublier le degré d'arbitraire qu'il comporte.

Ce système admis, on en déduit pour les grandeurs électriques le système d'*unités* bien connu, qui satisfait aux conditions ci-dessus indiquées, eu égard à l'état actuel de la science.

Mais sans examiner actuellement la manière dont on établit ce système cohérent d'*unités*, je voudrais présenter quelques observations sur ce qu'on appelle, depuis Maxwell, les relations entre les deux systèmes d'*unités*, ou, plus exactement, les deux systèmes *de dimensions des unités électriques*.

Ces relations se résument ainsi : *en prenant les rapports des expressions d'une même grandeur électrique dans le système dit électrostatique et dans le système dit électro-magnétique, on obtient une quantité de la forme* $(LT^{-1})^{\alpha}$, α *étant tantôt positif, tantôt négatif, égal à* 1 *ou* 2, *c'est-à-dire une puissance d'une* VITESSE.

Cette vitesse, qui est devenue l'un des éléments caractéristiques de la théorie de l'électricité, apparaît ainsi, on peut le dire, comme par hasard, et de la façon la plus singulière, car elle provient du rapport d'expressions *simplifiées* préalablement d'une manière *arbitraire*, en y faisant les coefficients des lois de Coulomb et de Laplace égaux à l'unité.

Si, au contraire, on n'opère pas ces simplifications arbitraires, si on laisse dans les expressions en dimensions des grandeurs électriques les coefficients k, a, λ, k' des lois générales, la vitesse en question apparaît d'une façon rationnelle et nécessaire.

En effet, considérons seulement l'une des grandeurs électriques (le raisonnement serait le même pour les autres grandeurs) : prenons la quantité Q, par exemple, exprimée comme elle doit l'être, en fonction de k dans le système Coulomb, de k' et λ dans le système Laplace, ces deux systèmes correspondant aux systèmes dits électrostatique et électro-magnétique (voir le tableau précédent), on a, pour l'expression en dimensions de l'*unité* de quantité, d'une part :

$$Q_k = \frac{1}{\sqrt{K}} M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1};$$

d'autre part :

$$Q_\lambda = \frac{\sqrt{K'}}{\Lambda} M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}};$$

Il en résulte :

$$\frac{\mathbf{Q}_k}{\mathbf{Q}_\lambda} = \frac{\mathbf{\Lambda}}{\sqrt{\mathbf{KK'}}}\,\mathbf{LT}^{-1}.$$

Or j'ai démontré précédemment que $\frac{\mathbf{\Lambda}}{\sqrt{\mathbf{KK'}}}$ est *nécessairement* l'inverse d'une vitesse, et cela par de simples considérations d'homogénéité, indépendantes de la nature physique des coefficients λ, k et k' (dont $\mathbf{\Lambda}$, $\mathbf{K}$ et $\mathbf{K'}$ représentent les *unités*).

Donc $\frac{\mathbf{Q}_k}{\mathbf{Q}_\lambda}$ est nécessairement égal à 1, *comme cela doit être*, l'unité de quantité (comme celle de toutes les grandeurs possibles) ne pouvant avoir au fond qu'une seule définition en dimensions. Mais, en même temps, on voit bien que si on trouve ordinairement, et si l'on dit que le rapport ci-dessus représente une vitesse $\mathbf{LT}^{-1}$, c'est parce qu'en faisant *au préalable* et *arbitrairement* $k=1$, $k'=1$, $\lambda=1$, dans les lois de Coulomb et de Laplace, *on a précisément réduit arbitrairement à l'unité* l'inverse d'une vitesse $\frac{\mathbf{\Lambda}}{\sqrt{\mathbf{KK'}}}$, qu'on n'a pas le droit de supprimer dans le rapport des unités de quantité.

On voit aussi que cette vitesse, représentée par $\frac{\sqrt{\mathbf{KK'}}}{\mathbf{\Lambda}}$, est la même que celle dont il s'agit dans les relations entre les deux systèmes d'unités considérés depuis Maxwell ; mais, sous cette forme, elle apparaît d'une manière qu'on est en droit d'appeler rationnelle ; car les coefficients k, k' et λ caractérisent précisément l'influence du milieu sur les actions électromagnétiques, et il paraît très naturel et très logique

qu'une certaine fonction de ces coefficients puisse représenter une vitesse, comme par exemple celle de la propagation dans ce milieu d'un mouvement électro-magnétique, de même qu'une certaine fonction $\sqrt{\frac{q}{\delta}}$ du coefficient d'élasticité et de la densité d'un milieu représente la vitesse d'un mouvement vibratoire qui s'y propage.

On ne peut s'empêcher de remarquer, à ce propos, combien il est étrange que Maxwell, qui a consacré un si bel ouvrage à exprimer mathématiquement et à développer les conceptions de Faraday sur la nature des actions électriques, conceptions où le rôle du milieu est prédominant et fondamental, ait en même temps et dans le même ouvrage, quand il s'est agi de créer un système d'unités pour calculer numériquement les phénomènes, supprimé *a priori*, dans les formules de dimensions de ces unités, les coefficients qui caractérisent précisément l'*influence du milieu*.

E. MERCADIER.

NOUVELLE THÉORIE

DES

PHÉNOMÈNES ÉLECTROSTATIQUES

HYPOTHÈSES SUR LESQUELLES EST FONDÉE LA THÉORIE MATHÉMATIQUE ACTUELLE DE L'ÉLECTROSTATIQUE.

1. La base de la théorie mathématique actuelle de l'électrostatique est la loi de Coulomb. En vertu de cette loi, deux corps électrisés placés dans l'air, à une distance réciproque suffisamment grande par rapport aux dimensions de ces corps, exercent l'un sur l'autre une force, attractive ou répulsive, proportionnelle à leurs charges et inversement proportionnelle au carré de leur distance. A cette loi qui a la certitude de l'expérience, mais qui est insuffisante pour permettre d'analyser complètement les phénomènes électrostatiques, on a adjoint la double hypothèse suivante :

On considère la *charge électrique* d'un corps comme une *masse électrique* que l'on ne suppose pas forcément être de la matière, mais à laquelle on attribue les propriétés de la masse matérielle, sauf celle de l'inertie. Ainsi elle est *divisible* comme la matière, la masse électrique d'un conducteur se composant de masses élémentaires répandues sur les divers éléments de la surface de ce conducteur; en outre, elle est *indestructible* comme la matière. En second lieu, on

étend, *par une hypothèse*, la loi de Coulomb aux masses électriques partielles existant dans les corps électrisés, de telle sorte que deux masses infiniment petites q et q', situées à une distance r l'une de l'autre, se repoussent avec une force f proportionnelle à $\frac{qq'}{r^2}$, et comme on fait généralement le coefficient de proportionnalité égal à 1, on écrit :

$$f = \frac{qq'}{r^2}.$$

Grâce à cette hypothèse et à la connaissance expérimentale des propriétés des corps conducteurs et des isolants, on a pu établir une théorie mathématique qui permet de calculer la distribution électrique sur les conducteurs et la loi des actions électriques dans tout l'espace, dès que l'on connait, par exemple, la charge électrique totale ou bien le potentiel de chacun des conducteurs. Ceci n'est vrai toutefois que pour les actions électriques observées dans l'air.

Lorsque le milieu isolant contient des diélectriques (liquides ou solides) autres que l'air, cette théorie est encore incomplète. Pour la compléter, on a recours à une *nouvelle hypothèse*, celle de la *polarisation des diélectriques* qui consiste en ceci : Lorsqu'un corps diélectrique C est en présence de corps électrisés, dans chaque élément de volume de ce corps l'*électricité neutre* est décomposée, une quantité q d'électricité positive se portant dans le sens de la force électrique et une quantité égale d'électricité négative se portant en sens inverse. Sur la surface de séparation de deux éléments de volume contigus, on a ainsi des masses électriques positives et négatives qui se neutralisent;

de telle sorte que l'effet résultant se réduit à celui de l'électricité positive qui s'est portée sur une partie de la surface du corps C et de l'électricité négative, en quantité égale, qui s'est portée sur l'autre partie de la surface. On dit que des quantités $+Q$ et $-Q$ d'électricité sont *induites* sur la surface du diélectrique C. La quantité d'électricité induite est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la force électrique du champ; elle dépend en outre de la nature du diélectrique.

2. L'exactitude de la théorie mathématique de l'électrostatique, au point de vue de la distribution électrique sur les conducteurs et du calcul des forces exercées, paraît suffisamment vérifiée par l'expérience. Néanmoins il y aurait tout intérêt à affranchir cette théorie des hypothèses sur lesquelles elle est fondée, en raison des objections qu'elles soulèvent et notamment des suivantes :

D'abord, si l'on considère comme réelle, ainsi que le font un grand nombre d'auteurs, l'existence des masses électriques, en poursuivant cette idée on peut aboutir à des conséquences inexactes, surtout lorsqu'on sort du domaine de l'électrostatique. D'autre part, l'existence des forces centrales inversement proportionnelles au carré des distances est liée à l'idée d'actions se propageant instantanément à toute distance, idée que les physiciens abandonnent de plus en plus comme irrationnelle. Du reste, elle ne permet point d'entrevoir un lieu entre les phénomènes d'électrostatique et ceux d'électro-dynamique, malgré les tentatives faites par d'illustres savants (Gauss, Weber, etc.). Enfin, un défaut grave de l'hypothèse de l'électrisation induite à la surface d'un diélectrique est de fournir

une valeur inexacte de l'énergie d'un système électrisé.

Il serait donc bien préférable d'établir la théorie mathématique de l'électrostatique sans s'appuyer sur ces diverses hypothèses ni sur d'autres analogues. La chose est-elle possible? Nous le croyons, et nous nous proposons de le démontrer par l'exposé suivant, où nous ne faisons que présenter les phénomènes électrostatiques sous un aspect nouveau.

NOUVEL EXPOSÉ DE LA THÉORIE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTROSTATIQUES.

3. *Exploration d'un champ électrique.* — Nous supposons que le lecteur possède la connaissance des expériences élémentaires de l'électrostatique, notamment celle des électrisations par contact et par induction, des propriétés conductrices ou isolantes de certains corps, de la non-existence des actions électriques à l'intérieur d'un conducteur électrisé, etc.

Sans faire aucune hypothèse sur les lois des actions exercées par des corps électrisés C_1, C_2..., dans l'espace isolant qui les entoure et auquel nous donnerons le nom de champ électrique, nous nous proposons d'explorer ce champ au moyen d'une sphère électrisée *s* (assez petite et assez peu électrisée pour ne pas exercer une perturbation sensible sur les corps C_1, C_2...). L'électrisation des corps C_1, C_2... et de la sphère *s* ne doivent pas varier, bien entendu, pendant la durée de cette exploration. La sphère *s* étant placée successivement en divers points du champ M_1, M_2, M_3..., y sera soumise à des forces dont on déterminera les directions et les grandeurs respectives F_1, F_2, F_3...

L'état électrique du champ sera connu quand on connaîtra la grandeur et la direction de la force F en chacun de ses points (pratiquement, en un nombre de points suffisamment grand).

Renouvelons l'expérience avec une seconde sphère électrisée s'. On déterminera les nouvelles forces F'_1, F'_2, F'_3... auxquelles cette sphère sera soumise aux mêmes points M_1, M_2, M_3... *L'expérience montre que les forces exercées sur les sphères* s *et* s' *en un même point ont même direction et que leur rapport a une valeur indépendante de la position de ce point.*

$$\frac{F'_1}{F_1} = \frac{F'_2}{F_2} = \frac{F'_3}{F_3} = \ldots\ldots = \lambda.$$

Nous mettons bien en évidence ce premier résultat emprunté à l'expérience.

Remplaçons la valeur ainsi déterminée de λ par le rapport de deux nombres μ et μ' :

$$\lambda = \frac{\mu'}{\mu},$$

l'un de ces nombres μ ayant une valeur choisie arbitrairement. On pourra écrire :

$$(1)\qquad \left\{ \begin{aligned} \frac{F_1}{\mu} &= \frac{F'_1}{\mu'} = f_1, \\ \frac{F_2}{\mu} &= \frac{F'_2}{\mu'} = f_2. \end{aligned} \right.$$

La valeur de λ étant indépendante de la position des points M_1, M_2..., c'est-à-dire indépendante du champ électrique, il en est de même des coefficients μ et μ'. Si l'on attribue le coefficient μ à la sphère s et μ' à la sphère s', on voit, par les équations (1), que le quotient f de la force F (ou F') exercée sur une sphère s ou (s') en un point M par le coefficient μ (ou μ') de cette

sphère est indépendant de la sphère employée et ne dépend que de la position du point M. Ainsi, en écrivant :

$$F = \mu f,$$

on met en évidence, dans la force F, que subit la sphère d'épreuve en un point du champ : 1° le coefficient μ d'influence de la sphère; 2° le coefficient f d'influence du champ au point considéré (de même que, dans la formule de la force $f = m\gamma$, en mécanique, on met en évidence le coefficient d'influence m de la masse et celui de l'accélération γ).

Désormais, au lieu de représenter l'état électrique du champ par les forces F_1, F_2, F_3..., qui dépendent de μ, c'est-à-dire de la sphère d'épreuve employée, nous le représenterons par les quantités $f_1 = \frac{F_1}{\mu}$, $f_2 = \frac{F_2}{\mu}$,... qui en sont indépendantes et que nous appellerons *forces électriques* aux points M_1, M_2,...

Jusqu'ici nous n'avons fait aucune hypothèse sur les corps électrisés C_1, C_2..., ni sur la nature du diélectrique qui peut être homogène ou hétérogène, ni sur la loi suivant laquelle les forces électriques f_1, f_2,... sont réparties, en grandeur et direction, aux divers points du champ. Mais, *si l'on admet le principe de la conservation de l'énergie*, la répartition de ces forces ne peut être quelconque et doit satisfaire à une certaine condition que nous allons déterminer.

4. *Existence d'un potentiel électrique.* — Lorsque la sphère d'épreuve s décrit dans le champ un chemin fermé, c'est-à-dire part d'un point M pour revenir au même point, chacun des corps électrisés, ainsi que le diélectrique et la sphère s elle-même, est exactement dans le même état physique et chimique après l'ar-

rivée qu'avant le départ. C'est du moins là une condition que nous supposons réalisée et qui est réalisable avec un grand nombre de diélectriques gazeux ou liquides ; et nous écartons le cas des diélectriques qui ne se prêteraient pas à cette condition. Il en résulte que l'énergie totale du système n'a pas varié, et il faut en conclure que le travail total de la force F, qui s'est exercé sur la sphère pendant son déplacement, est nul, c'est-à-dire que *la force* F *admet un potentiel*. Ce potentiel varie aux divers points du champ suivant une loi qui peut être absolument arbitraire.

La force $F = \mu f$ étant proportionnelle au coefficient μ de la sphère employée s, il en est de même du travail de cette force et, par suite, de son potentiel que l'on peut représenter par μV. La quantité V étant à la force électrique f, ce que le potentiel μV est à la force F, nous l'appellerons le *potentiel électrique* du champ. Il ne faut pas oublier que le potentiel électrique V n'est pas comparable à un potentiel mécanique, pas plus que la force électrique f n'est comparable à une force mécanique (puisque f est le quotient d'une force mécanique F par un facteur μ de nature inconnue).

L'exploration du champ électrique ayant fait connaître la grandeur et la direction de la force électrique f en chaque point, on pourra (au moins théoriquement) en déduire la forme des surfaces équipotentielles et la valeur du potentiel sur chacune d'elles. Inversement si l'on peut déterminer la loi de variation du potentiel, on en déduira la grandeur et la direction de la force électrique en tout point de l'espace; car on sait que la force f en un point M est normale à la surface équipotentielle passant en ce point et égale à $-\frac{dV}{dn}$, en

désignant par $-dV$ la chute de potentiel le long d'un chemin de longueur égal à dn suivant la normale.

Ainsi *le champ électrique admet un potentiel* V. Le potentiel V peut, du reste, varier, aux divers points du champ, d'une manière arbitraire, mais *continue.* La continuité du potentiel tient à ce que la force électrique reste finie; on ne conçoit pas, en effet, et l'on n'a jamais constaté l'existence de forces naturelles infinies. Mais la force électrique peut varier elle-même d'une manière discontinue, et ce cas se présentera constamment.

5. *Corps conducteurs.* — Supposons qu'un corps jouisse d'une propriété telle que dans le cas de l'équilibre électrique — seul cas étudié en électrostatique — aucune manifestation électrique ne puisse se produire dans sa masse (c'est le cas des conducteurs). La force électrique étant nulle en tous les points de ce corps, le potentiel, en vertu de sa définition même, y est constant en tous les points; et, par raison de continuité, il a la même valeur à la surface qu'à l'intérieur. La surface est donc équipotentielle.

6. *Corps solides.* — En raison de l'impénétrabilité des corps solides, on ne peut explorer le champ électrique à l'intérieur de ceux-ci, et les résultats acquis ci-dessus ne s'appliquent rigoureusement qu'aux gaz et aux liquides. Dans l'embarras où nous sommes à l'égard des corps solides, nous ferons *une hypothèse*, que du reste on fait toujours implicitement dans la théorie de l'électrostatique. Nous supposerons que les corps solides jouissent des mêmes propriétés électriques générales que les gaz et les liquides, et notamment que *le champ électrique y est caractérisé par l'existence d'une force électrique* f, dont la grandeur et la direction

peuvent varier aux divers points, et *qui admet un potentiel électrique* V.

7. *Conséquence de l'existence d'un potentiel : système de forces centrales équivalent au système des forces électriques.* — On peut résumer les paragraphes précédents en disant qu'un champ électrique est caractérisé par l'existence d'une force électrique f, variable d'un point à un autre, admettant un potentiel V. Nous allons montrer que par suite de l'existence du potentiel, quelle que soit la répartition des forces électriques, celles-ci sont identiques à celles qui résulteraient d'un certain système de forces centrales en raison inverse du carré de la distance.

En effet, lorsqu'on étudie le champ d'action d'une matière dont la densité ρ est variable aux divers points de l'espace et qui agit sur une matière semblable en raison inverse du carré de la distance, on démontre que la force ainsi développée dans le champ admet un potentiel V, qui satisfait à l'équation de Poisson (en coordonnées cartésiennes) :

$$\frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{d^2 V}{dy^2} + \frac{d^2 V}{dz^2} + 4\pi\rho = 0. \tag{2}$$

En supposant que la matière en question fût répandue en partie sur une surface avec une densité superficielle finie σ, on aurait pour tous les points de cette surface la condition connue :

$$\left(\frac{dV}{dn}\right)_1 + \left(\frac{dV}{dn}\right)_2 + 4\pi\sigma = 0. \tag{3}$$

Ces deux formules étant démontrées dans les traités d'électrostatique, nous nous bornons à les rappeler.

Inversement considérons un champ de force admettant un potentiel V. Pour tout point de l'espace où les dérivées secondes des potentiels existent et où, par

suite, la force varie d'une manière continue, l'équation (2) définira une certaine quantité ρ, fonction de x, y, z. Pour tout point d'une surface où la force varie d'une manière discontinue, l'équation (3) définira une nouvelle quantité σ. Si l'on considérait ρ comme densité de volume et σ comme densité superficielle d'une certaine matière agissant en raison directe de sa masse et en raison inverse du carré de la distance, le champ de force de cette matière aurait un potentiel V' qui, en vertu des théorèmes invoqués plus haut, devrait satisfaire à deux équations :

$$\left\{\begin{array}{l} \dfrac{d^2 V'}{dx^2} + \dfrac{d^2 V'}{dy^2} + \dfrac{d^2 V'}{dz^2} + 4\pi\rho = 0. \\ \left(\dfrac{dV'}{dn}\right)_1 + \left(\dfrac{dV'}{dn}\right)_2 + 4\pi\sigma = 0. \end{array}\right.$$

Pour achever de déterminer V', il faudrait ajouter à ces équations certaines conditions initiales. Si l'on impose à V' des conditions initiales satisfaites par V, évidemment V et V', qui satisfont aux mêmes équations aux dérivées partielles, seront identiques. Il en résulte que le champ de force produit par la matière de densité ρ (ou σ) produirait un système de forces équivalent, en tout point de l'espace, à celui qui existe et qui admet le potentiel V.

Cette démonstration s'appliquant à tout champ de force qui admet un potentiel, il en résulte que les actions électriques (en électrostatique, bien entendu) sont susceptibles d'être expliquées par l'existence de forces centrales en raison inverse du carré de la distance. On voit que la connaissance de la loi de Coulomb n'est même pas nécessaire pour établir ce résultat d'une manière certaine au lieu de l'admettre comme une hypothèse, ainsi qu'on le fait actuellement

dans la théorie de l'électrostatique. On remarquera en outre que ce résultat est indépendant de l'hétérogénéité du milieu et de son état de *saturation électrique* (cas où l'électrisation induite croît moins rapidement que la force électrique). Mais d'après la manière même dont on l'a obtenu, on doit bien se garder de considérer comme démontrée l'existence des masses électriques. La seule chose démontrée est l'*équivalence* du champ de force existant et du champ de force que développeraient de telles masses réparties conformément aux formules (2) et (3).

Nous ferons encore observer que si le champ électrique, au lieu d'être dans un état stable ou d'équilibre (cas étudié en électrostatique), varie d'un instant à l'autre d'une manière quelconque, la définition du potentiel n'a plus de sens *physique*. Par conséquent il n'existe plus un système de forces centrales équivalent au système des forces électriques réellement existantes dans le champ.

8. *Recherche expérimentale de la distribution de l'électricité.* — D'après l'exposé précédent, voici en quoi consistera l'étude d'un champ électrique. Quel que soit ce champ, nous savons à l'avance que les forces électriques qui s'y exercent sont identiques à celles qu'exercerait un certain agent, auquel nous donnons le nom d'*électricité*, distribué suivant une certaine loi. L'étude expérimentale du champ consistera donc, non pas à vérifier la loi de proportionnalité au produit des masses et à l'inverse du carré de la distance, qui est pour nous un fait acquis, mais à déterminer la loi suivant laquelle l'électricité est distribuée.

Application. — Prenons comme exemple le champ

développé dans l'air ambiant par une sphère conductrice électrisée S. Explorons ce champ au moyen de la sphère électrisée s, dont nous avons parlé plus haut, et supposons que la force F mesurée en un point quelconque M situé à une distance r du centre O de la sphère S, soit : 1° dirigée suivant le rayon MO, de O vers M ; 2° en raison inverse du carré de la distance r :

$$Fr^2 = \text{constante}.$$

On en conclut que la force électrique $f = \frac{F}{\mu}$ est également inversement proportionnelle au carré de r et, par suite, que le potentiel électrique V est inversement proportionnel à r :

$$Vr = \text{constante} = A.$$

Or, si l'on remplace V par $\frac{A}{r}$ dans l'équation (2), on trouve, tous calculs faits : $\rho = 0$. On en conclut qu'en tout point de l'air qui entoure la sphère la densité électrique ρ est nulle ; en d'autres termes, on constate que l'air n'est pas électrisé.

Si dans l'exploration du champ on trouvait que la force F est dirigée de O vers M, mais ne varie pas en raison inverse du carré de la distance, il en serait de même de la force électrique f. On en conclurait, par l'application de la formule (2), que l'air est électrisé, la densité électrique aux divers points variant suivant la loi :

$$\rho = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{d(fr^2)}{dr};$$

$\frac{d(fr^2)}{dr}$ désignant la dérivée, par rapport à r, du produit fr^2.

Revenons au cas où l'expérience montre que l'air n'est pas électrisé ($\rho = 0$). La sphère S étant conductrice, la force électrique est nulle à l'intérieur. Comme dans la couche d'air qui est au contact de la sphère, la force électrique a une valeur f_0 différente de zéro, cette force varie d'une manière discontinue d'un côté à l'autre de la surface de la sphère. C'est le cas d'appliquer l'équation (3), où l'on fera :

$$\left(\frac{dV}{dn}\right)_1 = 0 \text{ pour l'intérieur de la sphère,}$$

d'où

$$-4\pi\sigma = \left(\frac{dV}{dn}\right)_2 = \left(\frac{dV}{dr}\right)_2 = -f_0 \left(\begin{matrix}\text{force au contact} \\ \text{et à l'extérieur}\end{matrix}\right).$$

Ainsi l'on conviendra de dire que la surface de la sphère S est recouverte d'une couche électrique de densité superficielle $\sigma = \frac{f_0}{4\pi}$. La masse totale sera donc, en désignant par R le rayon de la sphère :

$$M = 4\pi R^2 \sigma = f_0 R^2.$$

Il en résulte que cette masse électrique M n'est autre chose que la valeur constante du produit fr^2, et, par suite :

$$f = \frac{M}{r^2}.$$

Quant à la force mécanique F subie par la sphère d'épreuve s, elle est donnée par la formule :

$$(4) \qquad F = \mu f = \mu \frac{M}{r^2},$$

et l'on dira que F est l'action exercée par la sphère électrisée S sur la sphère électrisée s.

Si l'on applique ici le principe de l'égalité de l'action

et de la réaction, la sphère s doit exercer sur la sphère S une force égale et opposée à F. L'expression de cette force devrait être analogue à l'expression (4), la charge M de la sphère S étant remplacée par la charge m de la sphère s, et le coefficient μ de celle-ci par le coefficient μ de la sphère S :

$$(5) \qquad F = \mu \frac{m}{r^2}.$$

La comparaison des formules (4) et (5) montre que l'on a :

$$\frac{\mu}{m} = \frac{\mu}{M} = \varepsilon.$$

Le premier de ces rapports ne dépendant que de la sphère s, et le second de la sphère S, leur égalité montre que la valeur commune ε est évidemment indépendante des sphères et de leur électrisation. On a donc finalement la formule symétrique :

$$F = \varepsilon \frac{Qq}{r^2},$$

qui n'est autre que l'expression de la loi expérimentale de Coulomb.

Cet exemple simple montre bien quels sont, dans notre nouvel exposé de l'électrostatique, les rôles respectifs de la théorie et de l'expérience. La *théorie* établit, — sans faire aucune hypothèse (sauf pour les corps solides et pour ceux, en général, qui ne satisfont pas aux conditions que la théorie suppose remplies)—, 1° l'existence de la force électrique en chaque point du champ ; 2° l'existence d'un potentiel électrique ; 3° l'équivalence du système des forces électriques réellement agissantes et d'un système de forces cen-

trales proportionnelles aux masses et inversement proportionnelles au carré des distances. L'*expérience* a pour objet de déterminer dans chaque cas l'état électrique du champ (c'est-à-dire la force f) d'où l'on déduit la répartition de ces masses. La théorie et l'expérience ainsi comprises forment un ensemble aussi complet que l'ensemble de la théorie ordinaire de l'électrostatique, des expériences sur lesquelles elle est fondée et des hypothèses que l'on a dû y ajouter.

Nous pourrions borner là notre nouvel exposé de la théorie des phénomènes électrostatiques; mais il paraît utile de voir comment s'expriment et s'interprètent dans cette théorie les propriétés électriques des corps révélées par l'expérience.

PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES CONDUCTEURS ET DES DIÉLECTRIQUES.

9. Si dans tous les problèmes d'électrostatique les masses électriques étaient distribuées d'une manière quelconque dans l'espace, la considération de ces masses ne serait d'aucune utilité : il serait préférable de déterminer la force électrique en tout point du champ sans rechercher la distribution de l'électricité, qui n'ajouterait rien à la connaissance de ce champ. L'importance considérable de l'intervention des masses électriques tient à certaines propriétés des corps, que l'expérience nous a fait connaître et dont nous allons parler.

Lorsqu'on déplace un conducteur électrisé à l'intérieur d'un diélectrique parfaitement isolant, l'*expérience montre* que sa charge électrique totale (déter-

minée comme il a été indiqué au paragraphe 8 pour la sphère électrisée S) reste invariable.

Si dans un diélectrique homogène, parfaitement isolant et non électrisé, on introduit un conducteur électrisé, l'*expérience paraît montrer* que, malgré l'existence du champ électrique dans la masse du diélectrique, celui-ci ne s'électrise point (pourvu que l'intensité du champ ne dépasse pas certaines limites); c'est-à-dire que dans un tel milieu la densité électrique ρ est nulle. D'après l'équation (2), le champ électrique satisfait donc à la condition :

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2} = 0.$$

D'autre part, à l'intérieur du conducteur et sur sa surface, on sait que le potentiel a une valeur constante V_0. Si, dans ces conditions, on connaissait la valeur de V_0, l'intégration de l'équation précédente ferait connaître la valeur du potentiel V en chaque point de l'espace et la masse électrique M du conducteur. Inversement, il suffira de connaître M pour déterminer V. Ainsi, dans ce cas, la simple donnée de la charge électrique du conducteur suffit pour déterminer la force électrique en tout point du champ.

Supposons que le même diélectrique parfaitement isolant soit préalablement électrisé, son électrisation satisfait à l'une des formules (2) et (3), et se calcule facilement lorsque l'on connaît la force électrique, et, par suite, le potentiel en tout point du champ. Si l'on introduit dans le diélectrique un conducteur électrisé, l'*expérience paraît montrer* que l'électrisation (ρ ou σ) reste invariable, au moins en tous les points où la substance du diélectrique reste sensible-

ment immobile. Si donc V′ désigne le nouveau potentiel du champ, ρ et σ satisferont aux nouvelles équations :

$$(2') \qquad \frac{d^2V'}{dx^2} + \frac{d^2V'}{dy^2} + \frac{d^2V'}{dz^2} + 4\pi\rho = 0,$$

$$(3') \qquad \left(\frac{dV'}{dn}\right)_1 + \left(\frac{dV'}{dn}\right)_2 + 4\pi\sigma = 0.$$

En retranchant membre à membre les équations (2) et (2′), (3) et (3′), on aura :

$$(2'') \qquad \frac{d^2(V'-V)}{dx^2} + \frac{d^2(V'-V)}{dy^2} + \frac{d^2(V'-V)}{dz^2} = 0,$$

$$(3'') \qquad \left[\frac{d(V'-V)}{dn}\right]_1 + \left[\frac{d(V'-V)}{dn}\right]_2 = 0.$$

Ainsi le champ électrique final (V′) peut être considéré comme la superposition du champ primitif (V) et d'un nouveau champ (V′—V) dans lequel, en vertu des équations (2″) et (3″), le diélectrique n'aurait aucune électrisation, le conducteur seul étant électrisé.

De même lorsqu'un diélectrique parfaitement isolant est déplacé *en bloc* à l'intérieur d'un autre corps, l'*expérience paraît montrer* que son électrisation reste invariable malgré ce déplacement.

Nous avons dit : l'*expérience paraît montrer*, parce que les propriétés que nous venons de citer ne sont pas, à notre connaissance, établies jusqu'ici par des expériences systématiques ayant donné à cet égard des résultats incontestables. On doit donc, dans chaque cas, considérer ces propriétés comme seulement probables et avoir soin de les vérifier. Lorsqu'elles peuvent être considérées comme certaines, on voit que la détermination de la force électrique en tout point d'un champ ne dépend que de la donnée des charges électriques des conducteurs qui existent dans ce champ.

Au lieu d'être obligé de mesurer la force électrique en tous les points, on n'aura qu'à la calculer en intégrant les équations (2) et (3) et tenant compte des données. C'est là une simplification importante, au moins dans un grand nombre de cas simples où l'intégration est possible.

10. *Interprétation mathématique de ces propriétés.* — Pour traduire les propriétés précédentes en langage mathématique, il suffit de dire qu'en tout point d'un diélectrique, lorsqu'on déplace dans le voisinage un conducteur électrisé sans déplacer la substance même du diélectrique au point considéré, les expressions $\left(\frac{d^2V}{dx^2}+\frac{d^2V}{dy^2}+\frac{d^2V}{dz^2}\right)$ et $\left(\frac{dV}{dn_1}+\frac{dV}{dn_2}\right)$ conservent une valeur constante. Mais il y a intérêt à présenter ce résultat sous une forme moins abstraite.

Imaginons, à cet effet, que l'on ait divisé l'espace en tubes de force, c'est-à-dire en tubes dont la surface latérale est engendrée par des lignes de force; nous supposerons cette division faite en un nombre infiniment grand de tubes à sections transversales infiniment petites.

Concevons en outre chacun de ces tubes divisé par des sections transversales en un nombre infiniment grand de tubes de longueurs infiniment petites; chacun de ces tubes infiniment petits sera un *tube élémentaire*. La surface d'un tube élémentaire comprend donc sa surface latérale et deux sections transversales, qui sont ses *bases*. L'une de ses bases s'appelle *base d'entrée* et l'autre *base de sortie* du tube, le sens d'un vecteur dirigé de la base d'entrée vers la base de sortie coïncidant avec le sens de la force électrique.

D'autre part nous rappelons que l'on appelle *flux de force électrique* à travers une surface ω infiniment petite prise en un point M quelconque de l'espace, le produit de l'aire ω par la projection de la force électrique en M sur la normale à la surface. Ainsi le flux de force à travers un élément de la surface latérale d'un tube de force est nul, puisque cette surface est, en chacun de ses points, normale à la direction de la force électrique.

Si dans un tube de force élémentaire, les flux de force électrique à travers les bases d'entrée et de sortie sont égaux, ce tube ne contient pas d'électricité. Lorsque ces flux sont inégaux, l'excès du flux de force à travers la base de sortie sur le flux à travers la base d'entrée est égal au produit du facteur 4π par la masse électrique que contient le tube. Cet énoncé équivaut aux équations (2) et (3), comme on le démontre dans la théorie mathématique de l'électrostatique; mais il est d'un usage souvent plus commode qu'elles.

Exemple. — Ainsi, dans le cas du champ d'une sphère électrisée S (§ 8), si l'on constate que la force électrique f varie en raison inverse du carré de la distance r au centre de la sphère, il est facile d'en conclure que l'air n'est pas électrisé. Dans ce cas, en effet, les lignes de force sont des rayons de la sphère, et les tubes de force sont des cônes ayant leur sommet au centre de la sphère. Divisons ces tubes en tubes élémentaires en les coupant par des sphères concentriques, qui sont des surfaces équipotentielles. Soient ω et ω' les aires des bases d'entrée et de sortie d'un tube élémentaire, f et f' les valeurs respectives de la force électrique sur chacune d'elles. Les flux de force correspondants sont les produits $f\omega$ et $f'\omega'$. Mais les

aires ω et ω' sont évidemment proportionnelles aux carrés de leurs distances r et r' au centre de la sphère, comme aires découpées sur des sphères concentriques par le même cône. Comme on a, par hypothèse :

$$fr^2 = f'r'^2,$$

on en conclut l'égalité :

$$f\omega = f'\omega';$$

c'est-à-dire que le tube élémentaire considéré, qui est quelconque, ne contient pas d'électricité.

Considérons maintenant un tube élémentaire tronc-conique prolongé infiniment peu à l'intérieur et à l'extérieur de la sphère. Sur la base d'entrée de ce tube, qui est à l'intérieur, le flux de force $f\omega$ est nul, puisque la force f est nulle. Donc l'excès $(f'\omega' - f\omega)$ se réduit au flux de force $f'\omega'$ à travers la base de sortie. Mais cette base est infiniment voisine de la sphère, et la force f' y est sensiblement égale à la force f_0 observée à la surface de la sphère. Donc la masse électrique qui se trouve dans le tube en question, et qui est sur la surface de la sphère puisqu'on peut l'en supposer rapprochée indéfiniment, est égale à :

$$\frac{f'\omega' - f\omega}{4\pi} = \frac{f_0\omega'}{4\pi}.$$

Sa densité superficielle est par conséquent $\frac{f_0}{4\pi}$, et la charge totale de la sphère est :

$$Q = \frac{f_0}{4\pi} \cdot 4\pi R^2 = f_0 R^2,$$

résultat trouvé plus haut (§ 8).

La notion de la variation de flux de force $(f'\omega' - f\omega)$ remplaçant celle de masses électriques, — pour exprimer qu'un diélectrique n'est point électrisé, on dira

que les flux de force à travers toutes les sections transversales d'un même tube de force sont égaux, ou, pour abréger, que le flux de force reste constant tout le long d'un même tube.

Un tube de force est dit *complet* lorsque la force électrique est nulle en tout point de ses deux bases. Ainsi un tube de force partant de la surface d'un conducteur et aboutissant à la surface d'un second conducteur est un tube complet, si on le suppose prolongé infiniment peu à l'intérieur de ces deux corps. Le flux de force étant nul sur chacune des bases d'un tel tube, l'accroissement total $(f'\omega' - f\omega)$ du flux de force lorsque l'on passe de la base d'entrée à la base de sortie est nulle et, par suite, *la masse électrique totale que contient le tube est nulle*, puisqu'elle est égale au quotient de cet accroissement par le facteur 4π. Ce résultat n'est qu'une conséquence évidente de notre définition de la masse électrique, tandis que dans la théorie ordinaire de l'électrostatique il constitue une *propriété* que l'on démontre.

11. Nous n'avons point parlé jusqu'ici de l'influence du milieu diélectrique sur l'intensité des actions électriques. Pour étudier cette influence, considérons une sphère électrisée S, que nous porterons successivement dans deux milieux isolants différents D et D′ non électrisés; et dans chacun de ces milieux nous explorerons le champ au moyen de la même sphère d'épreuve s, de coefficient μ. L'expérience montre que *l'action réciproque des deux sphères à une même distance* r *n'est pas la même dans les deux cas*. Ainsi, dans le diélectrique D, le produit constant de la force F, qui s'exerce sur la sphère s, par le carré de la distance r a une certaine valeur A; et dans le diélec-

trique D′ le produit analogue $F'r'^2$ a une valeur différente $A' = A\lambda'$. Mais le rapport λ' de ces deux produits est indépendant des sphères employées et ne dépend que de la nature des diélectriques D et D′. On peut écrire ce résultat :

$$\frac{F'r'^2}{Fr^2} = \frac{\mu f'r'^2}{\mu f r^2} = \lambda',$$

ou encore :

$$\frac{fr^2}{k} = \frac{f'r'^2}{k'};$$

en désignant par k un nombre choisi arbitrairement, que nous attribuerons comme coefficient au diélectrique D, et par k' le nombre $k\lambda'$, que nous attribuerons comme coefficient au diélectrique D′. D'après ce qui a été vu au paragraphe 8, les produits constants fr^2 et $f'r'^2$ ne sont autre chose que les valeurs M et M′ de la masse électrique de la sphère S portée respectivement dans les milieux D et D′. Ces valeurs étant inégales, on en conclut que la masse électrique d'une sphère électrisée varie lorsqu'on porte cette sphère d'un milieu isolant dans un autre. Mais le rapport :

$$\frac{M}{k} = \frac{M'}{k'} = Q$$

a une valeur invariable, puisqu'il est le même dans les deux milieux D et D′, qui sont quelconques. Cette quantité constante Q ne dépend que de l'état d'électrisation que possède la sphère S, et jouit du caractère d'invariabilité que l'on attribue à la *charge électrique* de ce conducteur tant qu'il reste isolé. Nous lui donnerons le nom de *quantité d'électricité* de la sphère S.

C'est pour simplifier l'exposé et, notamment, la loi de variation de la force f dans le champ, que nous

avons choisi le cas d'une sphère S; mais ce que nous venons de dire est général et pourrait être répété, avec une légère variante, si l'on remplaçait la sphère S par un ou plusieurs conducteurs de formes quelconques.

Nous n'avons parlé que de deux milieux D et D'. Si l'on en considère un nombre quelconque, on pourra donner à l'un de leurs coefficients k, k', k'', ..., par exemple à k, une valeur arbitraire; mais une fois cette valeur fixée, celles des autres coefficients k', k'', ..., le seront aussi, puisque leurs rapports λ', λ'', ... au coefficient k sont déterminés.

On voit, par ce qui précède, que la *masse électrique* et la *quantité d'électricité* d'un corps sont deux choses essentiellement distinctes et doivent jouir de propriétés très différentes dans les milieux non homogènes. Nous ferons mieux saisir ces différences par quelques exemples :

1° Désignons par m et q respectivement la masse électrique et la quantité d'électricité de la sphère d'épreuve s, de coefficient μ. D'après ce qui vient d'être dit pour la sphère S, le rapport de m à q est égal au coefficient k du diélectrique et ne dépend point, par conséquent, de la nature de la sphère s ni de son électrisation. D'autre part, on a vu au paragraphe 8 que le rapport de μ à m, qui est égal au coefficient ε, ne dépend pas non plus de la nature de la sphère s ni de son électrisation. En rapprochant ces deux résultats, on voit que le rapport de μ à q ne peut dépendre que de la nature du milieu diélectrique. Mais comme le coefficient μ de la sphère s est le même dans tous les milieux, ainsi que sa quantité d'électricité q, le rapport de μ à q ne dépend pas en réalité du diélectrique; c'est donc une *constante absolue*. La valeur de μ ayant été laissée

arbitraire jusqu'ici, il est donc permis — et il est rationnel — de la prendre égale à q.

La formule (4), relative à l'action réciproque des sphères S et s devient ainsi :

$$F = \mu f = q \frac{M}{r^2},$$

ou encore :

$$F = k \frac{Qq}{r^2}, \qquad (6)$$

$$F = \frac{1}{k} \frac{Mm}{r^2}. \qquad (6')$$

De ces deux dernières formes, la première est préférable dans les applications, car les quantités Q et q ne dépendent que de l'état d'électrisation des corps S et s, tandis que les masses M et m dépendent en outre de la nature du diélectrique.

2° Les formules (2) et (3) définissent la répartition des masses électriques d'une manière indépendante de la nature du diélectrique; c'est-à-dire que le champ de *force électrique* f attribué à ces masses électriques ne dépend ni du coefficient k du diélectrique supposé homogène, ni même de l'hétérogénéité du milieu. Mais il n'en est pas de même pour le champ de *force mécanique* F, puisque d'après la formule (6') deux masses M et m ont une action réciproque variable avec k, c'est-à-dire avec la nature du milieu. *Il y a donc lieu de bien distinguer le champ de force électrique* f *et le champ de force mécanique* F, contrairement à ce que l'on fait ordinairement. La confusion que l'on commet entre les propriétés de ces deux champs entraîne des erreurs assez graves, qu'il serait trop long de signaler ici.

3° La définition de la *quantité d'électricité* donnée ci-dessus ne diffère de celle de la *masse électrique*

qu'en ce que la force f y est remplacée par $\frac{f}{k}$. On en déduit que la densité (ρ ou σ) des quantités d'électricité existant dans le champ est définie par les formules :

$$(2^{\text{iv}}) \qquad \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{k}\frac{dV}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(\frac{1}{k}\frac{dV}{dy}\right) + \frac{d}{dz}\left(\frac{1}{k}\frac{dV}{dz}\right) + 4\pi\rho = 0,$$

$$(3^{\text{iv}}) \qquad \left(\frac{1}{k}\frac{dV}{dn}\right)_1 + \left(\frac{1}{k}\frac{dV}{dn}\right)_2 + 4\pi\sigma = 0,$$

différentes des formules (2) et (3), qui définissent la densité des masses électriques. Ainsi, dans le cas d'un milieu hétérogène, si le ρ de la formule (2) est nul, il n'en sera pas de même de celui de la formule (2^{iv}), et inversement; c'est-à-dire qu'il peut y avoir en un point de l'espace une quantité d'électricité sans qu'il y ait une masse électrique, ou inversement. En particulier, si dans un diélectrique hétérogène primitivement à l'état neutre on introduit un conducteur électrisé, on démontre qu'il y naît des *masses électriques*, tandis qu'aucune *quantité d'électricité* ne s'y développe. En d'autres termes un tel milieu jouit de la propriété exprimée par les formules (2^{iv}) et (3^{iv}) où l'on fait : $\rho = \sigma = 0$.

On confond bien souvent les deux choses auxquelles nous avons donné, pour les distinguer, les noms de *masse électrique* et de *quantité d'électricité*. Pour éviter toute confusion dans l'exposé de l'Electrostatique, il serait préférable, après avoir montré la différence de leurs propriétés, de ne plus parler que de la quantité d'électricité, qui joue un rôle plus naturel et plus important et qui intervient seule, par exemple, dans le calcul de l'énergie électrique.

VASCHY.

SUR UNE PROPRIÉTÉ GÉNÉRALE

DES CHAMPS ADMETTANT UN POTENTIEL (*)

Imaginons, en chaque point de l'espace un vecteur f, dont les composantes X, Y, Z, suivant trois axes rectangulaires, dérivent d'un potentiel uniforme V

$$X = -\frac{dV}{dx}, \quad Y = -\frac{dV}{dy}, \quad Z = -\frac{dV}{dz},$$

et bornons-nous à considérer le champ E limité par une surface fermée S. Nous supposerons le vecteur f fini et continu, sauf sur certaines surfaces de discontinuité s_1, s_2.... où sa composante normale $fn = \frac{dV}{dn}$ varie brusquement d'une face à l'autre.

Un tel champ jouit de la propriété suivante :

Il est toujours possible de trouver une distribution de masses m_1, m_2,... *telle que la fonction :*

$$(1) \qquad V' = \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} + \ldots = \sum \frac{m}{r}$$

soit identique à V *dans le champ* E*;* r_1, r_2... *désignant les distances respectives des masses* m_1, m_2... *au point* (x, y, z). Le sens que l'on attribue ici au mot masse est, en général, différent du sens ordinaire de ce mot; il est défini par l'identité $V' = V$.

(*) Extrait des *Comptes rendus* du 29 mai. Cette note contient la démonstration d'une proposition énoncée au paragraphe 7 du précédent article de M. Vaschy.

Pour démontrer cette propriété, considérons une fonction auxiliaire v assujettie : 1° à être identique à V dans le champ E; 2° à être nulle sur une surface S′ enveloppant complètement S, et en tout point extérieur à S′; 3° à varier entre les surfaces S et S′, de telle sorte que ses dérivées premières n'aient pas d'autre discontinuité que celle du genre décrit plus haut. Posons, en outre :

$$(2)\begin{cases} 4\pi\rho = -\left(\dfrac{d^2v}{dx^2} + \dfrac{d^2v}{dy^2} + \dfrac{d^2v}{dz^2}\right) = -\Delta v \text{ dans tout l'espace,} \\ 4\pi\rho = -\left(\dfrac{dv}{dn}\right)_1 - \left(\dfrac{dv}{dn}\right)_2 \text{ sur les surfaces de discontinuité,} \end{cases}$$

$-\left(\dfrac{dv}{dn}\right)_1$ et $-\left(\dfrac{dv}{dn}\right)_2$ désignant, suivant une notation usuelle, les dérivés de v prises le long des normales extérieures aux faces 1 et 2 d'une surface de discontinuité. On remarquera que ρ et σ sont évidemment nuls en dehors du champ E′ limité par la surface S′.

Adoptons maintenant ρ comme densité de volume et σ comme densité superficielle des masses m_1, m_2... La formule (1) prendra la forme

$$(3) \qquad V' = \int_{E'} \frac{\rho\, du}{r} + \int_{s_1, s_2} \frac{\rho\, d\omega}{r},$$

du et $d\omega$ étant respectivement des éléments infiniment petits de volume ou de surface, et les intégrales étant étendues : la première, au volume du champ E′; la seconde, aux surfaces de discontinuité.

Or, en vertu d'un théorème bien connu (propriété d'un potentiel de forces centrales inversement proportionnelles au carré des distances). La fonction (3) satisfait aux relations suivantes :

$$\frac{d^2V'}{dx^2}+\frac{d^2V'}{dy^2}+\frac{d^2V'}{dz^2}+4\pi\rho=0 \text{ dans tout l'espace,}$$

$$\left(\frac{dV'}{dn}\right)_1+\left(\frac{dV'}{dn}\right)_2 \qquad +4\pi\sigma=0 \text{ sur les surf. de discontinuité,}$$

ou bien, en posant $V'-v=U$ et tenant compte de (2)

$$\Delta U=0.$$

$$\left(\frac{dU}{dn}\right)_1+\left(\frac{dU}{dn}\right)_2=0.$$

Cette dernière relation montre que les discontinuités qui existent pour $\frac{dV'}{dn}$ et $\frac{dv}{dn}$ n'affectent pas $\frac{dU}{dn}$. Les dérivées premières de U sont donc continues.

ΔU étant nul en tout point de l'espace, il en est de même de l'intégrale $\iiint_{E''} U\Delta U\,dx\,dy\,dz$ étendue au volume E″ limité par une surface quelconque S″. On aura donc, en faisant sur cette intégrale une transformation bien connue :

$$o=\iiint_{E''} U\Delta U\,dx\,dy\,dz$$
$$=\iiint_{S''} U\frac{dU}{dn}d\omega-\iiint_{E''}\left[\left(\frac{dU}{dx}\right)^2+\left(\frac{dU}{dy}\right)^2+\left(\frac{dU}{dz}\right)\right]^2 dx\,dy\,dz,$$

$\frac{dU}{dn}$ désignant la dérivée de U prise le long de la normale extérieure à l'élément $d\omega$ de la surface S″.

Si l'on prend pour S″ une sphère de rayon R, on voit que l'intégrale double tend vers zéro quand R croît indéfiniment. En effet, d'après la forme de l'expression (1), on peut assigner deux constantes A et B telles que U, qui est égale à V′ en dehors de la surface S′, reste inférieur à $\frac{A}{R}$ et que $\frac{dU}{dn}$ reste inférieur à $\frac{B}{R^2}$ quand R dépasse une certaine limite R_0. Au-dessus de cette

limite R_0, la valeur de l'intégrale double est donc inférieure à $\frac{AB}{R^3}\iint_{S''} d\omega = L\pi \frac{AB}{R}$ qui tend vers zéro quand R devient infini. On en conclut que l'intégrale triple

$$\iiint_{E''}\left[\left(\frac{dU}{dx}\right)^2+\left(\frac{dU}{dy}\right)^2+\left(\frac{dU}{dx}\right)^2\right] dx\,dy\,dz$$

tend aussi vers zéro quand le champ E″ de l'intégration est infini. Pour que cette intégrale, composée d'éléments non négatifs, soit nulle, il faut que chaque élément soit nul et, par suite, que l'on ait :

$$\frac{dU}{dx}=\frac{dU}{dy}=\frac{dU}{dz}=0.$$

U est donc une constante, dont la valeur est nulle puisque à l'infini $U = V' = 0$. Cela revient à dire que V′ est identique à v et, par suite, identique au potentiel V dans le champ E.

Applications : 1° *Champ thermique.* — Supposons que le potentiel V représente la température aux divers points d'un champ thermique. En vertu du théorème précédent, on peut imaginer une distribution de masses m_1, m_2... telle que, si ces masses communiquaient à un point (x, y, z) quelconque les températures $\frac{m_1}{r_1}$, $\frac{m_2}{r_2}$... inversement proportionnelles à la distance r, la température résultante $\sum \frac{m}{r}$ serait identique à la température réelle V du point (x, y, z).

2° *Gravitation universelle.* — Si un point matériel est soumis, aux divers points d'un champ E, à une force f, et que l'on puisse établir l'existence d'un

potentiel, il résulte de la forme $\sum \frac{m}{r}$ que l'on peut donner à ce potentiel, que le champ E est identique à celui que développeraient des forces centrales proportionnelles aux masses et inversement proportionnelles au carré des distances.

3° *Champ électrique ou magnétique.* — On arrive à une conclusion analogue dans le cas d'un champ électrique ou magnétique admettant un potentiel; les masses m_1, m_2... sont alors ce qu'on appelle des masses électriques ou magnétiques. Nous reviendrons sur ce sujet dans une prochaine communication.

4° *Champ électro-magnétique.* — Même explication possible du champ d'un courant par l'existence de masses magnétiques, dans toute région où le potentiel est uniforme, c'est-à-dire en dehors d'un feuillet limité au contour du courant.

VASCHY.

NOTE

SUR LE

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DU FIL DE CUIVRE PUR

Depuis quelques années on a constaté, lors des fournitures de fil de cuivre de haute conductibilité, que dans bien des cas leur résistance électrique était inférieure à celle indiquée dans les traités d'électricité pour le cuivre pur. Il y aurait donc lieu de penser que cette dernière était fausse probablement parce qu'à l'époque où elle a été déterminée par les physiciens on ne pouvait pas se procurer du cuivre en fils aussi pur qu'aujourd'hui, soit aussi parce que l'échantillon ayant servi aux essais était très court et que les erreurs d'expériences, quoique très faibles, étaient relativement grandes. Dans ces conditions, il m'a paru très utile de mesurer de nouveau la résistance du fil de cuivre pur. A cet effet, j'ai fait faire par la maison Grammont, de Pont-de-Chérui, environ 100 mètres de fil de cuivre ayant exactement $0^m,001$ de diamètre et provenant de cuivre traité par l'électrolyse, dans cette même maison. L'analyse chimique faite sur 10 grammes de matière a montré que ce cuivre ne contenait en substances étrangères que des traces inappréciables de fer et de bismuth.

Pour déterminer la résistance électrique de ce fil, on s'est servi de l'appareil décrit dans les *Annales télé-*

graphiques (t. XV, p. 409), construit pour mesurer les résistances de fils métalliques à diverses températures.

Le fil placé sur le tambour avait une longueur de 100^{m},48. Pour obtenir cette longueur avec précision, on l'a déterminée de deux manières différentes : 1° par la mesure directe; 2° par le rapport de son poids 714^{gr},50 à 7^{gr},11 le poids d'un mètre. La première méthode a donné 100^{m},47 et la deuxième 100^{m},49. On a pris la moyenne entre ces deux nombres, c'est-à-dire 100^{m},48. La concordance des deux résultats montre que le fil était bien homogène et d'un diamètre bien uniforme. Cette uniformité de diamètre avait été obtenue en tréfilant le fil à travers une filière de diamant. La densité de ce cuivre déduite du poids de 1 mètre était égale à 9,05.

On a mesuré la résistance de ce fil d'abord à 0°, puis à des températures variant de 0° à 40°, afin de déterminer la loi de variation de ces résistances entre 0° et 40°, ce qui est suffisant dans la pratique. Pour porter à 0° le fil en essai enroulé sur le tambour, placé dans le cylindre intérieur de l'appareil déjà décrit, on a rempli de glace fondante tout l'espace compris entre les deux cylindres ; l'eau provenant de la fusion s'échappait par des trous pratiqués à la partie inférieure du cylindre extérieur. Comme dans ces conditions la température du fil ne descendait pas au-dessous de 1°, on a ajouté un peu de sel marin à la glace et on a obtenu ainsi 0° pendant 15 minutes pour ce fil. Sa résistance mesurée en ohms légaux, à l'aide d'appareils placés dans une pièce voisine, et dans laquelle la température était sensiblement la température d'étalonnement de la caisse étalon, a été trouvée égale

à $1^{\omega},968$, ce qui donne $19^{\omega},58$ pour résistance kilométrique à 0° d'un fil semblable.

Il est difficile de trouver un cuivre plus pur que celui sur lequel on a opéré, et on peut considérer $19^{\omega},58$ comme la résistance à 0° de 1000 mètres de fil de cuivre pur de 1 millimètre de diamètre.

Jusqu'à ce jour, on a pris pour valeur de cette résistance $20^{\omega},34$, et on a représenté par 100 la conductibilité du cuivre correspondant. Or, si 100 représente la conductibilité de l'échantillon qui a servi aux essais actuels, celle du cuivre ayant pour résistance 20,34 n'est plus représentée que par 96,26.

La mesure des résistances de ce même échantillon à des températures comprises entre 0° et 40° a été faite avec le même appareil et en opérant comme il a été indiqué précédemment. On a obtenu ainsi, les résultats ci-après :

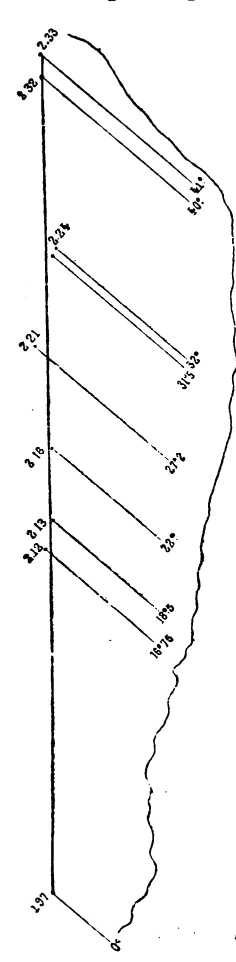
TEMPÉRATURES (1)	RÉSISTANCES du fil de cuivre (2)	VALEUR DU COEFFICIENT de variation entre 0 et chacune des températures (3)
0°	$1^{\omega},968$	»
16 75	2 ,119	0,00458
18 5	2 ,129	0,00442
22	2 ,159	0,00441
27 2	2 ,213	0,00457
31 5	2 ,240	0,00438
32	2 ,241	0,00433
40	2 ,319	0,00445
41	2 ,331	0,00449

Les valeurs de α de la colonne (3) sont déduites de la formule $R_t = R_0(1 + \alpha t)$.

La moyenne de ces valeurs est $\alpha = 0,00445$. C'est ce chiffre qu'il convient d'adopter comme valeur du

coefficient de variation de résistance du cuivre pur pour les températures comprises entre 0° et 40°.

Si on prend pour abscisses les températures et pour ordonnées les résistances et qu'on joigne par une droite les points correspondant aux résistances à 0° et à 40°, on a une droite dont s'écartent excessivement peu les extrémités des ordonnées représentant les résistances intermédiaires. Cette droite est la traduction de la formule $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ pour $\alpha = 0{,}00445$ et on peut la considérer sans erreur sensible comme représentant les diverses résistances entre 0° et 40°.



L'une des conclusions les plus importantes tirées des résultats des expériences décrites dans les *Annales télégraphiques* (t. XV, p. 409), et relatives à la détermination de la variation de la conductibilité électrique de quelques métaux, est la suivante :

« Le coefficient de variation de la résistance d'un fil de bronze ou d'un fil de cuivre avec la température est proportionnel à la conductibilité électrique de ce cuivre ou de ce bronze ».

On peut, en partant de cette loi, se proposer de calculer les différents coefficients qui correspondent à des cuivres ayant des conductibilités comprises entre

90 et 100, quand on les compare à la nouvelle base.

Le coefficient α_1 d'un cuivre ayant 90 p. 100 de conductibilité, par exemple, sera donné par la relation :

$$\frac{\alpha_1}{0,00445} = \frac{90}{100},$$

d'où

$$\alpha_1 = 0,00400.$$

On dressera ainsi le tableau suivant :

CONDUCTIBILITÉ DES CUIVRES par rapport à la nouvelle base (1)	VALEURS DES COEFFICIENTS de variation de la résistance de ces cuivres avec la température (2)
90 p. 100	0,00400
91 —	0,00405
92 —	0,00409
93 —	0,00414
94 —	0,00418
95 —	0,00423
96 —	0,00427
97 —	0,00432
98 —	0,00436
99 —	0,00441
100 —	0,00445

L'échantillon adopté jusqu'ici comme base, qui a 96,26 p. 100 de conductibilité, aurait alors pour coefficient $\alpha = 0,00428$.

Ce nombre diffère peu de 0,00388 trouvé par les physiciens et la différence peut s'expliquer par ce fait que la loi au moyen de laquelle on a calculé 0,00428, n'est qu'une loi approchée, une loi déduite de l'expérience et dont l'application peut donner des résultats qui diffèrent un peu de ceux obtenus dans les essais. Ensuite il est possible que ces physiciens aient trouvé $\alpha = 0,00388$ en portant à 100° le fil essayé et

il n'y aurait rien d'étonnant à ce que dans les températures aussi élevées, la variation ne suive pas la même loi qu'entre 0° et 40°, qu'elle soit plus faible, de sorte que l'application de la même formule $R_t = R_0 \times (1 + 100\alpha)$ ait dû donner pour α une valeur inférieure à 0,00428.

L'administration à l'habitude de demander que le cuivre de haute conductibilité ait un minimum de conductibilité égale aux 98/100e de celle du cuivre admis jusqu'ici comme pur. En prenant comme type l'échantillon sur lequel j'ai opéré, la conductibilité de ce cuivre serait représentée par 94,33 et la valeur correspondante de α serait 0,00420, nombre qu'il conviendrait de prendre dans les corrections relatives aux fils de cuivre commandés dans ces conditions.

La loi relative à la proportionnalité qui existe entre les conductibilités électriques de deux fils de même nature et les valeurs respectives des coefficients de variation de résistance avec la température s'est vérifiée d'une façon remarquable dans les deux cas suivants :

1° Le fil de bronze qui a servi aux expériences déjà décrites (t. XV, p. 409) avait à 0° une résistance kilométrique égale à $5^{\omega},182$, avec un coefficient $\alpha = 0,00152$.

Un autre fil de bronze ayant à 14°20 une résistance kilométrique égale $3^{\omega},945$, on demande de déterminer la valeur du coefficient α, relatif à ce deuxième fil (les deux fils étant ramenés au diamètre de 1 millimètre).

A 14°20, le premier fil a une résistance égale à

$$5^{\omega},182(1 + 0,00152 \times 14,20) = 5^{\omega},980,$$

d'où

$$\frac{\alpha_1}{0,00152} = \frac{5.980}{3.945}, \quad \alpha_1 = 0,00230.$$

Un deuxième fil de bronze ayant à 14°35 une résistance égale à $5^{\omega},320$, en supposant son diamètre ramené à 1 millimètre, on demande également de déterminer la valeur du coefficient α_2 relatif à ce fil, en faisant usage de la valeur

$$\alpha = 0,00152.$$

En opérant comme pour le cas précédent, on trouve

$$\alpha_2 = 0,00170.$$

Or, la détermination expérimentale de α_1 et de α_2 par la méthode déjà exposée a donné les valeurs suivantes :

$$\alpha_1 = 0,00231,$$
$$\alpha_2 = 0,00172,$$

nombres presque identiques à ceux obtenus par le calcul.

Les mesures électriques ont été faites par M. Jaulin, sous ma direction.

LAGARDE.

NOTE
SUR L'EFFICACITÉ COMPARATIVE
DE
DIVERS MODÈLES DE PARATONNERRES

Les lignes électriques se sont multipliées en France dans des proportions considérables en raison du développement ou de la création de nombreux réseaux téléphoniques, et la protection efficace des appareils qui desservent ces lignes est devenue une question de plus en plus à l'ordre du jour.

M. Lagarde a décrit dans les *Annales* de septembre-octobre 1887, et de janvier-février 1889, une méthode, qu'il a imaginée, pour comparer les efficacités des différents modèles de paratonnerre; mais, tout en donnant les résultats qu'il a obtenus, cet ingénieur signale les inconvénients de la méthode employée par lui : les résultats en valeur absolue ne sont pas comparables d'une série à une autre en raison de « l'inconstance des piles actionnant la bobine d'induction, de la variation de l'état hygrométrique de l'air ambiant, et de toutes les causes qui influent sur la charge électrique d'un corps électrisé à si haute tension. »

Une étude attentive de la question, et une série d'expériences préalables ont permis de constater d'abord, qu'une grosse bobine d'induction ne pouvait sans se détériorer, fournir d'une façon continue, pendant plusieurs heures de suite, des étincelles de 35 à 40 centimètres, ensuite que, quelles que soient les précautions prises, les causes d'erreur, signalées par

M. Lagarde, ne pouvaient être évitées, et enfin que, en raison de l'impossibilité où l'on se trouve de produire des décharges toujours identiques à elles-mêmes, le classement, par ordre de mérite, des mêmes paratonnerres, variait fréquemment d'une série à une autre.

Il a paru dès lors nécessaire : 1° de rechercher une autre source d'électricité ; et 2° de ne plus examiner comment se comportent deux paratonnerres sous l'action successive de deux décharges identiques ; mais bien au contraire de comparer simultanément deux paratonnerres en présence d'une même décharge.

Source d'électricité. — On s'est arrêté comme source d'électricité à une jarre de 0ᵠ,03 chargée au moyen d'une machine de Wimshurst. Cette machine donne, dans de bonnes conditions hygrométriques, des étincelles de $0^{m},15$ à $0^{m},20$.

En raison de la tension énorme de l'électricité employée, les pertes sont considérables dans le dispositif formé par la jarre et la machine, et pour éviter que les quantités d'électricité fournies par la machine ne servent uniquement, après quelques tours, à réparer ces pertes, il convient de forcer ces quantités et de donner, à cet effet, une grande vitesse aux plateaux de la machine.

On se servait, dans ce but de trois petits moteurs électriques montés en dérivation, absorbant en tout 150 watts, et imprimant au plateau une vitesse de 1.200 tours.

La décharge de la jarre produisait en court circuit, après une minute de charge, une étincelle éclatant avec un fracas douloureux pour l'oreille et paraissant avoir de 8 à 9 centimètres de diamètre.

Lorsque la jarre était, au contraire, déchargée à tra-

vers les connexions et les organes du dispositif d'expériences, dont il nous reste à parler, l'étincelle était évidemment moins violente, et semblait ne plus avoir que 5 ou 6 centimètres de diamètre.

Les conducteurs, employés pour les connexions, étaient constitués par du câble à trois couches de gutta, et on évitait tout croisement de fils. Les fils qui étaient destinés à relier et à un moment donné le dispositif à la jarre et se trouvaient alors à une différence de potentiel énorme, étaient, en outre, supportés par des ficelles de 5 mètres de long tendues dans la pièce, et maintenus ainsi au moins à 50 centimètres l'un de l'autre (voir *fig.* 1). Si ces derniers conducteurs n'étaient

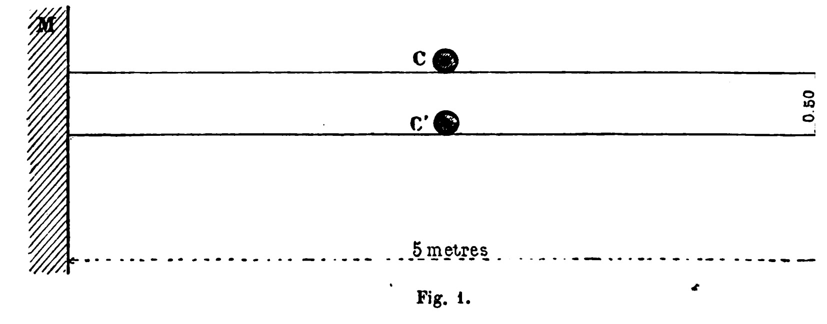


Fig. 1.

qu'à quelques centimètres l'un de l'autre, on entendait l'électricité fuser en crépitant à travers les pores de la gutta.

Dispositif adopté. — 1 et 2 sont les câbles d'aller et retour (voir *fig.* 2); ils arrivent par leur extrémité libre sur un gros tube de verre, et forment les deux branches d'un excitateur, dont le manche est constitué par le tube de verre.

Le câble d'aller 1 se bifurque en A en deux circuits identiques BCDK et B'C'D'K.

B et B′ sont les deux paratonnerres à comparer ;

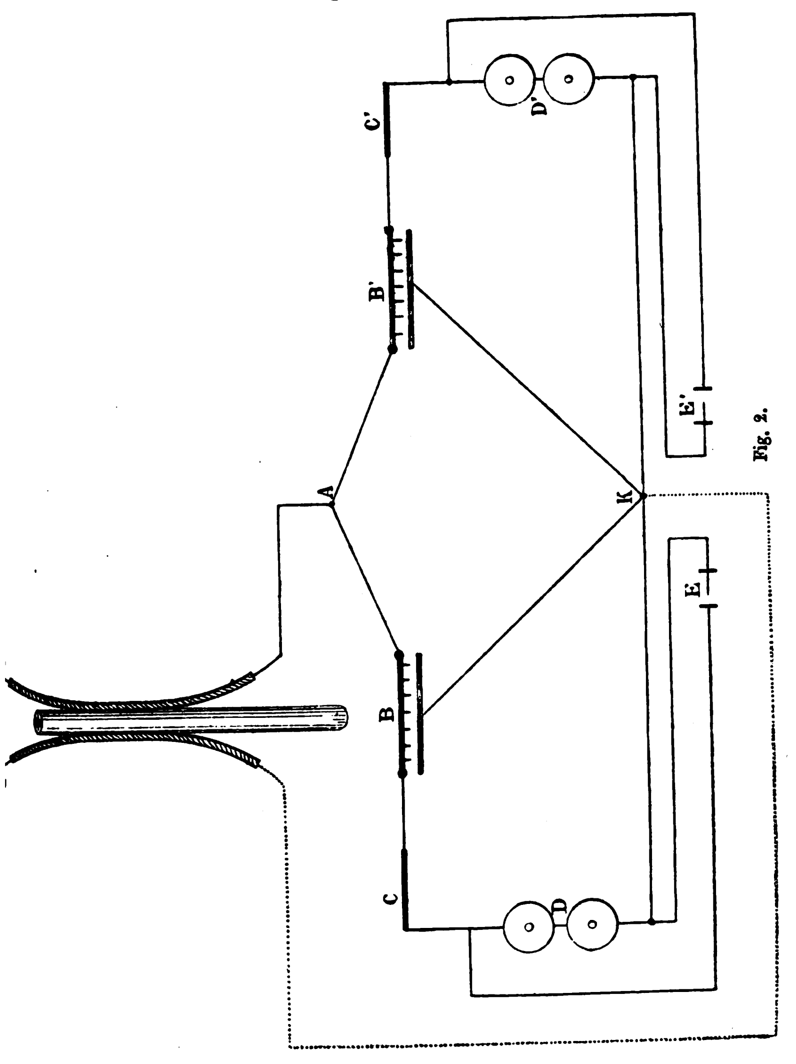


Fig. 2.

C et C′ deux paratonnerres à fils préservateurs protégeant les deux sonneries D et D′ de 500 ohms.

Puis les deux circuits se rejoignent en K sur le fil de retour 2.

Les bornes des deux sonneries D et D′ sont reliées à des indicateurs E et E′ constitués par une plaque dont on peut approcher une vis platinée. La tête de la vis porte un disque divisé en 72 parties égales, le pas de la vis est de $0^{mm},73$ environ, chaque division correspond donc à 1/100 de millimètre environ. Il est évident que plus importante, toutes choses étant égales d'ailleurs, sera la quantité d'électricité qui traversera la bobine D, plus importante sera la manifestation électrique, c'est-à-dire l'étincelle en E.

Or les circuits ABCDK et A′B′C′D′K sont identiques, ils représentent l'installation d'un poste dans la pratique; si donc, les indicateurs en E et E′ sont convenablement réglés, les valeurs relatives des étincelles éclatant en E et E′ indiqueront les efficacités relatives des deux paratonnerres B et B′ pour une même décharge.

Pour régler les indicateurs E et E′, on amène les câbles 1 et 2 aux deux pôles d'une pile. Les sonneries fonctionnent; on tourne la vis de E, jusqu'au contact avec la plaque, les sonneries placées en court circuit se taisent; on dévisse alors de *n* divisions. Ce nombre *n* dépend d'ailleurs de l'efficacité du paratonnerre essayé. On opère de même pour l'indicateur E′ en prenant le même nombre *n*. On a ainsi une première approximation que l'on rectifie s'il y a lieu au cours de l'expérience.

Conduite d'une expérience. — L'expérience se conduit de la façon suivante : on charge la jarre pendant un temps *t*, puis on approche brusquement des armatures les extrémités des câbles 1 et 2; la décharge éclate et se bifurque dans les deux circuits, une partie

s'échappant par les paratonnerres B et B′, le reste passant par les sonneries D et D′ et les indicateurs E E′.

Les indicateurs E et E′ étant placés l'un contre l'autre dans un endroit obscur, on constate facilement la valeur relative des étincelles qui s'y produisent. On vérifie le circuit au moyen de la pile, et on recommence. Si après une série de décharges, on constate la supériorité des étincelles à l'indicateur E par exemple, cette supériorité est due soit à l'infériorité du paratonnerre B, soit à un réglage défectueux des indicateurs. Pour trancher cette question, on permute les paratonnerres B et B′, et la supériorité doit passer de l'indicateur E à l'indicateur E′, si non c'est le réglage qui est en cause et on le modifie.

Des tâtonnements successifs ont toujours permis d'obtenir ce résultat; le paratonnerre associé à l'indicateur qui donne les plus fortes étincelles est inférieur à l'autre, puisqu'il laisse arriver dans la sonnerie correspondante une plus grande quantité d'électricité.

Quand les paratonnerres à comparer sont très bons, l'indicateur doit être très peu ouvert pour qu'un phénomène électrique s'y manifeste, et l'on a dû, dans certains cas, n'admettre qu'un écart de moins de 1/100 de millimètre entre la pointe platinée et la plaque opposée.

Le réglage des indicateurs est assez délicat lorsque les paratonnerres à comparer sont très peu différents, et il faut parfois plusieurs heures pour le réaliser et arriver à des constatations bien nettes.

Cette méthode a permis de retrouver des résultats identiques au commencement et à la fin d'une même journée, aussi bien qu'à des époques différentes; il y a donc tout lieu de la croire efficace.

Résultats des expériences. — Les essais ont porté sur des paratonnerres à lame d'air (soit à deux plaques, soit à deux peignes genre Bertsch, soit à une plaque et un peigne), sur des paratonnerres à stries et sur des paratonnerres à feuille isolante de papier, gutta ou mica.

Paratonnerre à air et à deux plaques. — L'efficacité d'un tel paratonnerre est indépendante de sa surface, elle ne dépend que de l'épaisseur de la lame d'air et du poli des lames métalliques.

On n'a pu différencier deux paratonnerres à air dans lesquels les plaques avaient le même écartement et présentaient soit la même surface, soit une surface quadruple. D'un autre côté, on établit facilement l'infériorité d'un paratonnerre ayant déjà reçu un certain nombre de décharges avec un paratonnerre identique, mais dont les plaques viennent d'être repolies.

Ainsi, un paratonnerre à air venant d'être repoli, avec un écartement de 75/100 de millimètre, a été trouvé identique à un paratonnerre ayant déjà servi et n'ayant que 50/100 d'écartement. En repolissant les plaques de ce dernier, il a fallu porter son écartement à 75/100 pour retrouver l'identité.

A la suite de ces premiers essais, le paratonnerre à air et à plaques a été pris comme terme de comparaison.

Il était constitué de la manière suivante :

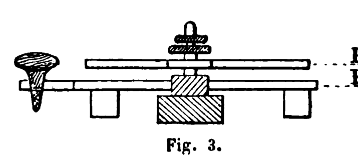


Fig. 3.

Une première plaque reposant sur quatre pieds et reliée à la terre. Au-dessus, une deuxième plaque reposant sur deux bornes à contre-écrou et embrochée sur la ligne. Des rondelles permettent de faire varier l'écartement des deux plaques (voir *fig.* 3).

Paratonnerre à air et à deux peignes. — Pour un écartement des plans des pointes de 1 millimètre, il y a équivalence avec un paratonnerre à plaques de 1 millimètre d'écartement; l'équivalence se maintient encore à peu près pour un écartement de 8/10 de millimètre. Pour 5/10 de millimètre, l'efficacité a été trouvée intermédiaire entre les efficacités de paratonnerres à plaques de 5/10 et 6/10 de millimètre. Cette différence est dans la limite des erreurs d'expérience.

Paratonnerre à air à une plaque et un peigne. — Le modèle essayé avait un écartement de 8/10 de millimètre entre la plaque et le peigne; il était l'équivalent d'un paratonnerre à plaque de 12/10; cette différence peut s'expliquer par l'état de la surface de la plaque qui laissait beaucoup à désirer.

Paratonnerre à feuille isolante. — Avec une feuille de papier de 7/100 de millimètre, prise dans un bloc à dépêches, l'efficacité du paratonnerre a été la même que celle d'un paratonnerre à air de 40/100 de millimètre. La protection est alors très complète et il faut amener la pointe de l'indicateur à moins de 1/100 de millimètre de la plaque opposée pour pouvoir constater encore une étincelle. Le papier est percé à chaque décharge soit d'un trou unique qui atteint jusqu'à 3 millimètres de diamètre, soit de 2, 3 ou plusieurs trous de diamètres moindres, correspondant à une décharge polyfurquée.

Il convient aussi de remarquer la différence des effets mécaniques dans les paratonnerres à papier et à air. Dans les premiers, on constate comme des coups de poinçon très nets, auréolés d'une tache brune; dans les seconds, on ne voit guère qu'une tache; et l'on peut dès lors se demander si le paratonnerre à feuille

de papier ne se détériore pas plus facilement que le paratonnerre à air sous l'influence des décharges.

Si la feuille isolante est constituée par du papier paraffiné, l'efficacité est à peu près la même que lorsqu'on remplace la feuille paraffinée par deux ou trois feuilles de papier de même nature et présentant la même épaisseur totale, avec une légère différence toutefois en faveur du papier non paraffiné.

Le paratonnerre avec la feuille de gutta de 6/100 de millimètre d'épaisseur, en usage dans l'Administration, correspond à un paratonnerre à air de 170/100 de millim.

Si l'on remplace la feuille de gutta par une feuille de mica, de 8/100 de millimètre, l'efficacité n'est plus que celle d'un paratonnerre à air et à plaque de 200/100 de millimètre.

Paratonnerres à stries. — Dans les paratonnerres du modèle de l'administration des Télégraphes, placés sur les sonneries de facteur, l'écartement des plans des stries est de 45/100. Ce paratonnerre, quand il est neuf, est équivalent à un paratonnerre à air et à plaque de 80/100 de millimètre. Son peu d'efficacité provient sans doute de l'état des surfaces en présence, lesquelles ne sont pas polies.

Conclusions. — Les paratonnerres à air et à plaques ont une efficacité qui ne dépend que de la distance des plaques métalliques et de leur poli; toutefois, si l'on se reporte à diverses applications de ce genre de paratonnerre, on constate que lorsque l'écart des plaques n'est que de 3/10 ou 4/10 de millimètre, il se produit des mises à la terre de la ligne en l'absence de tout

ısées sans doute par une

momentanément un court

aussi rapprochées.

Les paratonnerres à air et à peignes ont une efficacité comparable aux premiers ; leur construction est beaucoup plus compliquée, il est vrai, mais il semble qu'ils seraient à l'abri des courts circuits précités. De plus, ils présentent un autre avantage, c'est d'offrir par leurs pointes, on le constate facilement, un écoulement à l'électricité alors que celle-ci n'a pas une tension suffisante pour éclater en étincelle.

Parmi les paratonnerres à feuille isolante, il y a lieu d'écarter les paratonnerres à feuille de gutta ou de mica et d'adopter les paratonnerres à feuille de papier paraffiné aussi mince que possible ; le papier paraffiné n'est pas hygrométrique comme le papier ordinaire, et on obtient des efficacités comparables à celle des paratonnerres à air et à plaques dans lesquels la distance des plaques est telle que de courts circuits peuvent s'y établir spontanément ; la feuille de papier ne doit pas, bien entendu, être évidée ni découpée, sinon on retomberait dans un paratonnerre à air et à plaque.

Paratonnerres à air et à peignes à faible écartement, ou paratonnerres à feuille de papier paraffiné, voilà jusqu'à ce que la pratique soit venue, comme pour les paratonnerres à air et à plaques, nous en montrer les défectuosités, les types de paratonnerres qui nous semblent les meilleurs. Ils ont leurs avantages et leurs inconvénients : le premier paraît plus complet et n'oblige pas à une manœuvre toutes les fois qu'il a été traversé par une décharge, mais le second peut être établi pour un prix de revient bien inférieur au premier.

E. MASSIN.

EXPÉRIENCES NOUVELLES

SUR LES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

M. Armstrong, dans une communication lue à la Société littéraire et scientifique de Newcastle, et publiée par l'*Electrical-Review* (17 février 1893), donne quelques détails intéressants à propos d'observations nouvelles faites par lui sur les décharges électriques.

Ses expériences semblent prouver l'existence de deux courants de sens contraire, l'un négatif, l'autre positif, le premier passant à l'intérieur du second. Des phénomènes fort curieux ont été produits soit avec de l'eau pure, soit avec des poussières peu conductrices. Voici quelques détails sur ces recherches :

1° *Avec l'eau pure.* — M. Armstrong prend un flacon à long col présentant une ouverture latérale ; le col est fermé hermétiquement par un bouchon traversé par une tige métallique qui soutient l'extrémité d'une tresse de fil de coton placée dans la bouteille ; l'autre extrémité de la tresse passe par l'ouverture latérale, et son diamètre est à peu près égal au diamètre de cette ouverture ($2^{mm},5$). Il remplit le flacon ainsi préparé d'eau pure et le place dans une cuve également pleine d'eau pure. Si on provoque la décharge d'une forte bouteille de Leyde, le flacon étant en relation avec le pôle positif et la cuve avec le pôle négatif, on constate que le coton s'élève dans le flacon ; si on renverse le courant, il retombe. L'eau s'échauffe un

peu et on constate à l'œil des remous qui permettent de voir qu'il y a mouvement de l'eau ; comme la quantité d'eau contenue dans le flacon est invariable, il y a donc formation de deux courants contraires, l'un entrant, l'autre sortant du flacon ; de plus, comme le coton doit être vraisemblablement entraîné par le courant intérieur, il semble bien que ce courant est le courant négatif.

2° *Avec des poussières.* — Ces poussières sont : de la magnésie calcinée mêlée de charbon de bois, de la poudre de tripoli, ou du charbon dur en poudre.

On dispose les expériences de deux manières différentes : l'étincelle est produite soit parallèlement, soit perpendiculairement à une plaque recouverte d'une légère couche de poussière.

Dans les deux cas, on observe la formation de lignes circulaires autour du centre de l'étincelle. Une mince feuille de plomb, découpée en forme de croix et soutenue au-dessus de la plaque, ne trouble pas le phénomène, ce qui semble prouver que ce n'est pas un mouvement de l'air qui en est la cause. Il y aurait donc, dans un espace chargé uniformément de poussière, formation de sphères concentriques. D'autre part, les courbes issues du pôle positif s'écartent notablement pour aller rejoindre le pôle négatif, tandis que celles issues du pôle négatif ne semblent faire aucun effort pour se rendre au pôle positif. Cette remarque confirme donc encore l'hypothèse du passage du courant négatif à l'intérieur du courant positif pendant la décharge électrique.

DEVAUX.

MESURE

DE LA

DURÉE DES CONVERSATIONS TÉLÉPHONIQUES (*)

M. Strecker a décrit, il y a quelque temps, un mesureur de la durée des conversations téléphoniques, qui devait permettre d'établir une taxe téléphonique sur des bases plus rationnelles que le tarif actuel. Les raisons qui motivent l'introduction d'une nouvelle taxe, et les conditions que doit remplir le mesureur de temps qui constituerait l'appareil de contrôle, ont été exposées par M. Strecker.

L'Administration télégraphique allemande a fait construire un appareil analogue d'après les mêmes conditions générales, avec cette seule différence que le compteur n'est en mouvement qu'entre le moment où l'on décroche le téléphone et celui où il est remis en place, tandis que dans l'appareil de M. Strecker le mouvement d'horlogerie ne s'arrête qu'après l'émission du signal fin de conversation.

L'appareil construit par la Société Mix et Genest, se compose essentiellement d'un mouvement d'horlogerie à pendule et d'un échappement que le mouvement du crochet commutateur met en marche. Lorsque le ressort moteur est complètement détendu, l'abonné en est prévenu par un signal, et il ne peut se servir du téléphone avant d'avoir remonté l'horloge.

La *fig.* 1 donne une vue d'ensemble de l'appareil, les *fig.* 2, 3 et 4 en montrent des détails. Le bras de levier intérieur A du crochet (*fig.* 3) est relié avec une bielle L, qui peut être amenée à la longueur voulue au

(*) *Lumière électrique*, t. XLVIII, p. 481, d'après *l'Elektrotechnische Zeitschrift.*

moyen de l'écrou régulateur M. Cette tige L traverse le couvercle D du poste téléphonique (*fig.* 1) et se pro-

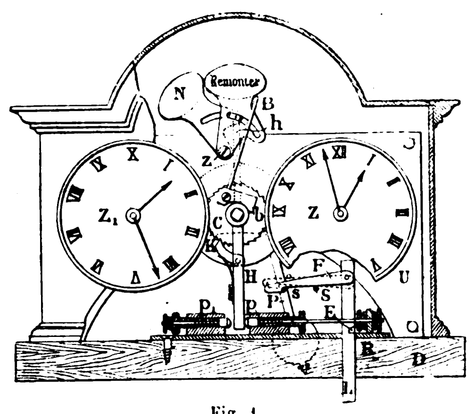


Fig. 1.

longe dans la boite U. L'extrémité supérieure de la tige L porte un crochet F, mobile autour d'une cheville, et qui s'appuie sur le doigt fixe S.

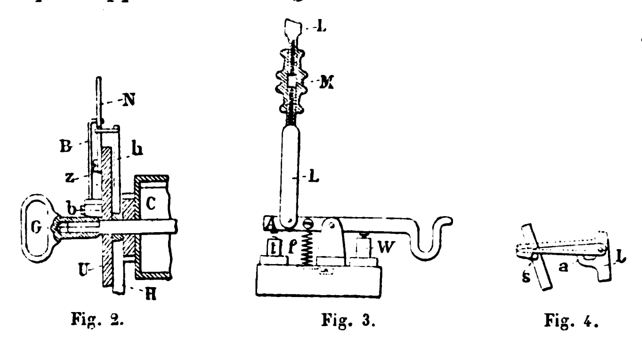


Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4.

L'extrémité gauche de ce crochet présente une forme telle que le taquet *s* de la tige du pendule P vient, au bout d'une oscillation du pendule, s'accrocher à la saillie de cette pièce F. La *fig.* 4 représente une modification de l'extrémité supérieure de L, où le doigt S est remplacé par le support *a*.

Au moment où l'on décroche le téléphone, le ressort *f*

abaisse le levier A. Dans ce mouvement, la tige L descend en entraînant la partie postérieure du crochet F, dont l'autre extrémité prend la position indiquée en pointillé sur la figure. Le pendule s'échappe et met en marche le mouvement d'horlogerie. Le cadran Z indique, comme dans les horloges ordinaires, les heures et les minutes. Quand la durée totale enregistrée excède douze heures, le cadran Z_1 indique les multiples de douze heures, et l'on peut d'ailleurs en ajoutant d'autres cadrans, étendre la durée d'enregistrement totale jusqu'à 1.000 heures, par exemple.

Pour empêcher l'emploi du téléphone quand le mouvement d'horlogerie ne peut fonctionner et doit être remonté, le ressort moteur C, une fois complètement détendu, permet à un verrou d'avancer et d'arrêter tout mouvement du crochet commutateur. A cet effet, le rochet K de la roue dentée du remontoir est mobile autour d'une cheville qui n'est pas fixe, mais que porte un levier H (*fig.* 1) pouvant osciller autour de l'axe même du remontoir. L'extrémité inférieure libre de ce levier H se meut entre deux tampons p et p_1, dont l'un p est muni d'un ressort plus puissant que l'autre p_1.

Arrivé à bout de course, le mouvement d'horlogerie n'exerce plus aucun effort sur le rochet K ; l'extrémité libre du levier H se meut vers p_1. Par ce mouvement, un verrou R est poussé dans une ouverture E de la tige L.

Le prolongement h du levier H fait tomber un disque N, mobile autour de la cheville z et en équilibre instable. Ce disque tombe devant une ouverture de l'appareil, et fait paraître l'indication « Remonter ». L'introduction d'une clef de montre G écarte un petit levier b, dont le second bras très long et élastique, B, ramène le disque indicateur dans sa première position.

GUTTAS-PERCHAS AMÉRICAINES(*)

NOUVELLES MÉTHODES DE PRÉPARATION

Dans un travail antérieur, je présentais un nouveau mode de préparation du caoutchouc au moyen de *coagulants* et d'*antiseptiques* combinés, et indiquais sommairement des études analogues par moi faites sur les guttas-perchas ; j'ai pu compléter ces études dans un nouveau voyage ; le Laboratoire municipal de Paris a analysé les guttas que j'ai ainsi obtenues et les a reconnues pour être de véritables guttas, pures de tout mélange.

Il m'est donc permis de faire connaître aujourd'hui ces nouveaux procédés, résultat de mes études.

Importance de la question. — Il n'est pas inutile de faire, au préalable, ressortir l'importance capitale de ces études, car, on le sait, les guttas dont on peut se servir en électricité disparaissent de jour en jour et les ingénieurs compétents voient arriver avec terreur le moment où les bonnes guttas, les seules possibles dans la construction des câbles sous-marins, seront absolument introuvables.

État de la question. Sources de provenance. — Un grand nombre d'arbres, vivant tous dans les régions torrides du globe, donnent un latex qui, par sa coagulation, produit des guttas-perchas, guttas-perchas qui,

(*) La *Lumière électrique*, nos 15 et 16, tome XVIII.

lorsqu'elles viennent d'être produites, sont semblables, ou à peu près, c'est-à-dire que l'analyse chimique y trouve le même hydrocarbure fondamental, des glucosides spéciaux; que l'analyse spectrale, que l'examen au microscope, que l'excitabilité, la tolérance, la conductibilité, ou plutôt la non-conductibilité, lorsqu'on les soumet à des appareils permettant d'indiquer les mesures électriques; que l'examen physique et microscopique indiquent des corps tellement voisins qu'il est impossible de classer alors ces diverses guttas.

Elles sont produites : en Malaisie, à Sumatra, à Bornéo, dans la presqu'île de Sumatra, d'abord et en tête par l'*Isonandra percha* de Hooker, qui aurait à peu près disparu; par des Isonandras-guttas découverts ou étudiés par M. Burk, par le D[r] Oxley, par M. Wray; plus récemment encore par M. Seligman-Lui et par M. Sérullas; ce dernier après de patientes études aurait retrouvé l'Isonandra de Hooker, ou une espèce tellement voisine qu'il est difficile de les distinguer, et dont la gomme est identique.

On étudiait en même temps, ou plutôt on essayait d'introduire dans le commerce, des gommes provenant d'espèces nouvelles : *Payena*, *Leerii*, *Sideroxylon* ou *Siderocarpus*; *Guana chrysocarpa* de Pierre; les *Bassia* de Burck et les *Bassia* de Clarke; le *Dichopsis* de Krantz au Cambodge; bientôt on cherchait au Nouveau-Monde des guttas qu'on crut d'abord identiques, après être passé par le Sénégal, où Parke avait indiqué un nouveau *Bassia* analogue à ceux de Clarke et de Burck; on indiqua au Brésil le *Chrysophyllum*; dans les Guyanes le *Mimops Balata*, voisin du *Mimops Kauki* de Célèbes.

Je m'arrête dans cette nomenclature : il faudrait un

volume pour indiquer toutes les espèces découvertes ; chaque voyageur a voulu avoir son arbre, sa gutta à lui. Aussi est-il sorti de tout cela une confusion lamentable ; un voyageur donnait son nom à un arbre déjà bien connu sous une autre désignation, et le nombre des guttigènes augmentait considérablement pendant que, de fait, la gutta elle-même diminuait dans des proportions effrayantes.

J'ai essayé de voir clair dans cette question : j'ai dû y renoncer après plus de deux mois de travail, après avoir lu, annoté, relu et comparé tout ce qui a été écrit, ou à peu près, sur la question depuis trente ans, et en plusieurs langues.

J'en ai conclu ce fait, bien connu de tous : c'est que la gutta-percha n'est pas une ; qu'elle n'est pas toujours produite par le même arbre déterminé, et surtout qu'elle arrive sur le marché après avoir subi des préparations ou des sophistications telles qu'il est impossible d'éclaircir encore la question.

Cependant M. Sérullas, dont on ne saurait trop apprécier les études consciencieuses sur cette question ardue, études pratiquées sur les lieux et *de visu*, indique le moyen de reconnaître sur pied un *Isonandra* qui donnera une gomme de bonne qualité ; indication précieuse.

C'est qu'en effet, si un grand nombre d'arbres, d'espèces, même de familles différentes, donnent *des guttas*, c'est-à-dire des corps en tout semblables entre eux pour leurs propriétés physiques et chimiques, il s'en faut du tout au tout que ces guttas soient également bonnes pour les applications industrielles ; ce fait est bien connu des électriciens ; je l'ai moi-même vérifié.

Bonnes et mauvaises guttas. — Lors de ma première

expédition dans le Haut-Orénoque, je rapportai des échantillons de guttas tirés d'arbres appelés par les Indiens du pays *Masarandu*, *Pindare*, *Marima* et par des *Balatas* vrais; arbres appartenant tous à la famille des *Mimosées* ou à celle des *Sapotacées;* mais ces échantillons, au nombre d'une cinquantaine, avaient tous été préparés par moi au moyen de méthodes différentes : mélange des laits dans des proportions variables, fumage, évaporation lente ou rapide (ombre, soleil ou ébullition), traitement par des corps chimiques, chlorure de sodium, de calcium, de zinc, soude et potasse, chlorate de potasse, acides divers (sulfurique, acétique, azotique, chlorhydrique, etc.); enfin par des antiseptiques proprement dits : acide phénique, créosote, bichlorure de mercure, etc.

Eh bien, toutes ces gommes, qui étaient manifestement des guttas, en avaient les caractères chimiques, physiques, microscopiques et électriques, se ressemblaient beaucoup étant fraîches. Mais, au bout de quelques semaines, des caractères différentiels apparurent, puis s'établirent de plus en plus au bout de quelques mois : certaines étaient devenues cassantes, même friables, se ramollissant peu sous l'influence de la chaleur; d'autres étaient manifestement devenues résineuses; les unes blanches, les autres grises, noirâtres; enfin, plusieurs avaient conservé leur couleur gris rosé initiale, c'étaient les meilleures; celles aussi chez lesquelles je ne constatai pas de *fermentations*.

Études micrographiques. — En effet, dans tous les échantillons qui devaient changer d'aspect et d'allures, j'assistais à la formation de spores et de mycélium; une moisissure tantôt verdâture, tantôt noirâtre, tantôt d'un beau rouge ponceau s'étendait sur les plan-

ches, les imprégnait, disparaissant par l'ébullition ou par l'immersion dans un bain de sublimé, puis se reformant au bout de quelques jours : l'examen microscopique me permettait de suivre l'évolution de cette vie d'infinement petits ; bientôt même je découvris la naissance de virgulines et d'anguillules douées de mouvement : c'était là comme un excellent terrain de culture pour toute une série de parasites.

Au contraire, dans les échantillons qui se maintenaient sains en apparence, cette vie inférieure avait une intensité beaucoup moins grande ; certains même parurent conserver pendant plus de dix-huit mois une stérilisation absolue. Ils séjournèrent plusieurs mois sous l'eau, salée ou non : leurs caractères primitifs semblaient se maintenir indéfiniment. Et cependant, je dois faire remarquer que l'industrie n'accepte guère les guttas provenant des arbres américains ; que, sur les marchés on les refuse et qu'on s'accorde à dire dans le monde des électriciens que le *Chrysophyllum du Brésil* et le *Mimusops balata* des Guyanes donnent une gutta qui ne peut servir dans la fabrication des câbles sous-marins.

Qu'en conclure, sinon que la *préparation seule* a le pouvoir de conserver à une gomme produite par un *Balata* toute sa valeur initiale, valeur qui égale *au début* celle de l'Isonandra, même celle de Hooker ?

Action des micro-organismes. — Car, je le répète, et je le crois fermement : tout latex fourni par un groupe d'arbres d'espèces très différentes, tels que le *Balata* et l'*Isonandra*, contient quand il s'écoule tous les éléments d'une bonne gutta, et chacun s'accorde à remarquer que toutes les guttas sèches, bonnes ou mauvaises, renferment un hydrocarbure spécial que je

propose d'appeler la *guttéine*, qui se trouve partout, dans toutes, qui est comme le stigmate, comme le cachet indélébile et fondamental de toute gutta, bonne ou mauvaise pour l'industrie.

Il est difficile d'être affirmatif en ces matières : cependant après de longues études sur divers latex, ceux du caoutchouc et ceux des divers guttifères américains, après de nombreuses observations et un nombre incalculable d'essais et d'expérimentations, je suis arrivé à me former une opinion, discutable sans doute, mais à laquelle je crois fermement : elle m'est personnelle ; ne trouvant ailleurs nulle trace d'études semblables, je demande à l'exposer ici. Elle aurait, je le sais, besoin d'être complétée par d'autres études faites en divers points du globe, pour les caoutchoucs au Sénégal, à Madagascar ; pour les guttas à Bornéo, Sumatra et dans la presqu'île de Malacca. Malheureusement, je ne puis parler que de ce que j'ai vu : les arbres à lait des bassins de l'Orénoque et de l'Amazone.

Composition des guttas. — Mais si les espèces, si les familles mêmes, varient, les lois botaniques sont les mêmes dans tous les points du globe et les arbres à lait sont toujours et partout des végétaux obéissant aux mêmes lois. Leur lait est une émulsion de globules spéciaux dans un liquide très riche en eau : ces globules contiendraient, selon M. Payen, trois principes immédiats qu'il appelle *gutta*, *fluavile* et *albane*, principes isomériques, dont la formule unique serait $C^8 H^7$, que j'appelle *guttéine*, carbures d'hydrogène si voisins qu'il est impossible de les différencier ; M. Payen les obtenait en traitant les globules par l'alcool absolu et bouillant. Selon lui, ils entrent dans la composition de la gutta dans les proportions suivantes :

Gutta	75 à 82	p. 100
Fluavile	16 à 14	—
Albane	6 à 3 1/2	—

Le carbone varie de 87,64 à 88,29 p. 100 relativement à l'hydrogène, qui varie de 11,79 à 12 p. 100.

La formule d'oxydation serait la suivante :

Carbone	83,5
Hydrogène	11,5
Oxygène	5
	100,0

Pourquoi Payen, à qui nous devons tous les faits chimiques et les études les plus complètes de la gutta, trouve-t-il ces variations de teneur en gutta, fluavile et albane ? Sans doute parce que les guttas qu'il a analysées n'étaient pas toujours les mêmes, ce qui prouve bien qu'il n'y a pas de la gutta, mais bien des guttas plus ou moins propres aux besoins industriels. Payen a fait en outre porter ses études seulement sur les gommes venant d'*Isonandras percha*.

Eh bien ! je puis affirmer, après les analyses chimiques qui ont été faites des échantillons que j'ai rapportés de l'Amérique du Sud, que telle était aussi la composition des bons comme des mauvais échantillons, à quelques molécules près ; seul, le microscope parlait éloquemment, indiquant sur les bons échantillons une stérilisation presque absolue, et sur les mauvais des colonies très vivaces, très nombreuses, très diverses, de microbes fort actifs ; mais aussi la formule d'oxydation paraissait varier beaucoup.

Pourquoi cette différence ?

Pourquoi de bonnes et de mauvaises guttas. — Le lait de l'*Isonandra* qui donnera une bonne gutta s'écoule, paraît-il, très lentement, il est crémeux, visqueux,

très épais et se coagule presque instantanément ; quand on voit un lait plus clair mettant plusieurs heures, même plusieurs jours à se coaguler spontanément, on peut affirmer, dit-on, que, même provenant d'un Isonandra, il donnera une très mauvaise gomme, impropre à l'industrie.

L'isonandra est une Sapotée ; le *Masarandu*, qui croît en abondance sur les bords de l'Orénoque et du Rio-Negro (et j'en ai compté trois espèces bien nettes et un grand nombre de variétés), est de la même famille ; son lait est également très épais et se coagule très vite, mais pas complètement, c'est-à-dire que le magma reste assez longtemps à l'état pâteux.

Le *Pindare* (j'en connais deux espèces), au contraire, se coagule très lentement ; le *Marima* beaucoup plus vite. Quant aux *Mimusops balata*, la coagulation en est extrêmement lente.

J'ai remarqué moi-même la vérité de cette loi : plus un lait de guttifère se coagule rapidement, meilleur est la gutta et *plus grande est sa stérilisation ;* moins, en même temps, ces laits contiennent le véhicule eau.

Lois. — Telle est la loi que je crois pouvoir poser :

1° *La stérilisation naturelle d'une gutta est en raison inverse du véhicule ;*

2° *Cette stérilisation est la raison de l'inaltérabilite de la gutta*, c'est-à-dire de son utilisation possible pour les diverses industries.

Je crois donc — et l'analyse des différents laits que j'ai rapportés en solution dans le chloroforme le prouve — que tout latex sortant d'une *sapotée* et d'une *mimosée* est identique, quant à sa partie solide, ou solidifiable (hydrocarbure-guttéine), mais qu'il varie

seulement quant à la partie véhicule, quant à son eau, à peu de chose près.

Ce fait me paraît jeter une lumière singulière sur ce qui va se passer ultérieurement pour les guttas venant de ces sources diverses.

Discussion. — En effet, personne n'a pu expliquer jusqu'ici d'une manière satisfaisante pourquoi certaines gommes, qui paraissent bonnes au début, s'altèrent si facilement dans un temps variable ; pourquoi elles deviennent dès lors impropres à certaines industries, en particulier à celle, la plus importante, de la télégraphie sous-marine, si cruellement atteinte par la baisse d'importation de guttas convenables, menacée même dans son existence, dans son avenir, assure-t-on. On a fait intervenir des produits d'oxydation spéciaux, des dédoublements de glucosides colorants, des réactions chimiques lentes, des polymérisations, des changements d'état moléculaire ; mais ce ne sont là que des hypothèses, bien mieux, des mots vagues et creux, créés pour cacher le néant de l'idée : aucune explication sérieuse, aucune pensée scientifique dignes d'un esprit observateur ne sont venues éclairer cette question si obscure.

La seule chose qui ait été vue a été cette modification profonde dans l'équilibre moléculaire des guttas un peu vieilles ; cela est visible et certain : quand une gutta, de souple et extensible, par la chaleur est devenue cassante, il ne faut pas être grand clerc pour affirmer que son état moléculaire n'est plus le même ; de même qu'il ne faut pas être un grand savant pour affirmer que lorsqu'un fil d'acier, d'abord résistant et élastique, est devenu grenu, ses fibres, ses molécules ont subi un changement dans leurs intimes connections.

Mais à quoi est due cette altération profonde dans la structure de la gutta, ou plutôt de certaines guttas ? Tel était le problème sérieux et scientifique ; d'abord au point de vue théorique, ensuite et surtout au point de vue pratique, car sa solution devait contenir au moins des indications sur la préparation d'une bonne gutta.

Ce problème, je me l'étais posé dès 1887 pour le caoutchouc et pour les guttas. En 1889, je l'avais absolument résolu pour le caoutchouc : le caoutchouc blanc, produit par ma méthode antiseptique, était appelé à remplacer le noir caoutchouc du Para, le premier du monde ; non que mon caoutchouc fût meilleur, mais parce qu'il était aussi bon et qu'il supprimait l'opération si longue du fumage, c'est-à-dire près des deux tiers de la main-d'œuvre ; je démontrai aussi à cette époque que le caoutchouc indien du Para devait ses qualités au fumage pratiqué par les Indiens, qui font ainsi de l'antiseptie inconsciente, mais très réelle et durable.

J'étais arrivé à une solution à peu près analogue pour les guttas, mais je ne la publiai pas à cette époque, d'abord pour des motifs personnels, ensuite et surtout parce que je voulais voir ce que deviendraient avec le temps mes guttas ainsi produites et parce que mes expériences sur place n'étaient pas finies ; elles ont été complétées et corroborées pendant ma dernière exploration.

Je partis du même principe que pour la fabrication de mon caoutchouc antiseptique, et je prie mes lecteurs de vouloir bien se rapporter à ce que j'ai déjà écrit à ce sujet : pour moi la modification moléculaire venait de la *fermentation* seule ; arrêter cette fermentation,

ou mieux l'empêcher de se produire par l'antiseptie, était conserver à des planches ainsi produites toute leur valeur initiale, c'est-à-dire empêcher les modifications extérieures dans l'équilibre moléculaire.

OBSERVATIONS.

Action de l'hydratation. — Quant au mécanisme exact, au point de départ de cette fermentation, il est assez difficile de le saisir. Mais étant donné que plus le lait est épais plus tôt il se coagule spontanément, meilleure, *c'est-à-dire moins oxydée*, sera la gutta, ne peut-on conclure de ce fait d'observation continuelle que la présence de l'eau en quantité est la cause première de la formation des infusoires et des microbes de toutes sortes ?

Si la planche, en effet, se prend vite, c'est-à-dire s'il y a peu d'eau à évaporer, il y a moins d'échanges entre elle et l'air ambiant, et la présence de l'oxygène de l'eau décomposée ne vient pas favoriser la formation des colonies microbiennes.

Au contraire, si la coagulation met plusieurs jours à se faire, l'oxygène de l'eau, même celui de l'air qui peut pénétrer dans les interstices interfibrillaires du magma, d'abord fort mou, favorise et hâte la fermentation : c'en sera fait de la planche ; elle est d'ores et déjà viciée, elle porte le germe des bacilles, des spores, des anguillules qui ne vont pas tarder à produire des toxines, sans doute des alcaloïdes comme les ptomaïnes, enfin des résidus de secrétions excrémentielles et, comme résultat, la désorganisation de la gutta.

Action de l'air. — Un fait, en outre, que j'ai remarqué et qui vient à l'appui de ma théorie est le suivant : sur

une planche de gutta-percha qui reste bonne je fis au microtome des coupes que j'examinai au microscope deux jours après la coagulation : le tissu était dense et serré et je ne découvris pas la présence de l'air, c'est-à-dire je ne vis pas de vacuoles dans lesquelles il aurait existé de l'air au sein même de la planche, qui avait été stérilisée par moi avec soin dans l'étuve à 120°, degré très voisin de son point de fusion, de suite après la coagulation.

Au contraire, je remarquai que sur des planches obtenues par un lait clair de Balata, après une évaporation lente qui avait duré plusieurs jours, l'intérieur du coagulum était, quelques jours après sa formation, farci de petites bulles d'air microscopiques, de volume variable, certaines ayant à peine 3 μ. Soumises à l'ébullition, les coupes me montrèrent alors un changement d'état très notable : certaines des bulles avaient crevé à l'extérieur ; d'autres, dans leur effort d'expansion, s'étaient réunies les unes aux autres, des anfractuosités s'étaient formées, même des diverticula dont plusieurs communiquaient avec l'air extérieur, la planche étant ramollie ; et un plus grand nombre encore apparurent, quand, par refroidissement, la planche se fut durcie. Comment cet air était-il au milieu de cette surface absolument imperméable ? Évidemment, il y était venu et était resté au moment de la coagulation, son arrivée et sa présence ayant été favorisées par la lenteur de l'opération, par des échanges continus entre le magma en formation et l'atmosphère. C'est, du reste, dans ces vacuoles que j'ai toujours
dont je parlais plus haut ; plus
lemment par la manipulation que
fait subir à toute gutta, à une

haute température, par l'incorporation de soufre, d'hyposulfite de zinc ou de plomb, par la vulcanisation en un mot, qui la rendent antiseptique momentanément, ou au moins l'aseptisent complètement.

Mais alors il n'est plus temps : le travail de déséquilibration moléculaire s'est produit, les fermentations ont eu lieu, les désordres survenus dans la structure intime de la gutta ont désorganisé sa substance : cette gutta est tarée à jamais et devient inutilisable. D'autant que les manipulations industrielles, la vulcanisation, la chaleur et le laminoir n'ont peut-être, probablement, pas fait disparaître les vacuoles contenant de l'air, communiquant avec l'air extérieur, nouvelle source d'apport et de développement de germes, que la présence du chlorure de sodium dans l'eau de mer va singulièrement favoriser dans leur éclosion ; et le travail de désorganisation continuera encore mieux au fond de l'Océan.

Action de l'air, de l'eau douce, de l'eau de mer. — J'ai remarqué, en effet, que deux fragments de la même planche de gutta obtenue par l'évaporation lente d'un lait clair et péniblement coagulable, planche destinée par conséquent à devenir mauvaise, ces deux fragments stérilisés à l'étuve, puis plongés pendant un an dans deux vases couverts dont l'un contenait de l'eau de rivière, changée tous les deux jours, l'autre de l'eau de mer, artificiellement faite et changée également tous les deux jours, l'aspect de ces deux fragments s'était bien modifié dans les deux vases, en même temps que le reste de la planche, jeté au fond d'un tiroir, indiquait ce que cette même gutta était devenue au contact de l'air.

Des trois morceaux, le plus altéré était celui qui

avait séjourné dans l'eau salée, puis celui qui était resté en contact de l'air, en dernier lieu seulement celui qui était plongé dans l'eau ordinaire ; celui-ci s'était modifié d'une manière si peu sensible que je n'ose affirmer qu'il se fût même modifié.

Pour servir de contre-épreuve, j'avais fait la même expérience avec une gutta *venant du même arbre*, mais préparée suivant mon procédé antiseptique que j'indiquerai plus loin ; cette gutta n'avait pas bougé, ni dans l'eau chlorurée sodique ni dans l'air, et il n'y avait pas trace de spores ou de microbes à sa surface, de la famille des spores que je retrouve sans cesse sur les guttas avariées, préparées par coagulation lente.

Il faut conclure de ces faits d'observation :

1° Qu'une gutta de qualité inférieure (j'entends pour l'industrie) est profondément altérée par l'eau de mer, qui agit sans doute par sa forte minéralisation basique, peut-être même par osmose de ses sels alcalins, dans une gutta déjà désorganisée, ce milieu alcalin étant une condition des plus favorables à l'éclosion de germes d'infiniment petits.

(Il serait intéressant de vérifier l'action des courants électriques sur ces infiniment petits passant dans l'âme d'un câble fait avec une gutta de cette qualité inférieure).

2° Qu'une gutta de qualité inférieure exposée à l'air est assez rapidement un bon terrain de culture, et est, conséquemment, assez vite altérée.

3° Qu'une gutta de qualité inférieure, mais stérilisée avant son immersion, immergée dans l'eau ordinaire courante, paraît ne pas s'altérer, au moins pendant un certain temps, ne pas renfermer de microbes et par conséquent se comporter comme une bonne gutta.

J'ai dit « stérilisée avant son immersion », afin de me rapprocher le plus possible de ce qui se passe dans la pratique, la vulcanisation, la chaleur, en un mot les manipulations industrielles devant détruire tous les spores qu'elle peut contenir.

N'est-on pas en droit de conclure, comme je le disais plus haut, que tout latex guttigène est également bon quand il s'écoule de l'arbre, mais que, suivant son degré d'hydratation le mettant plus ou moins longtemps en contact avec l'oxygène et avec l'air, il sera un bon terrain d'ensemencement pour les colonies microbiennes, ou restera stérile? Ce fait expliquerait pourquoi la gutta de l'*Isonandra percha* restait immuable et toujours semblable à elle-même, pourquoi la gutta du *Mimops balata*, du *Chrisophylum* du Brésil s'altérerait rapidement et serait le siège d'une modification moléculaire : il en résulterait que la préparation seule, sur le lait frais, est capable de corriger ce degré plus ou moins grand d'hydratation, capable en un mot, de ramener tous les latex au même type par une coagulation rapide jointe à une antiseptie méthodique.

Mais cette coagulation rapide doit être obtenue d'une certaine façon : il ne faudrait pas croire qu'il suffit, par exemple, de chauffer fortement le lait très mélangé d'eau, en remuant, pour obtenir par coagulation rapide une excellente gutta : je l'avais cru moi-même ainsi, et l'expérimentation m'a appris que je m'étais complètement trompé.

Résines ; leur présence dans toute gutta. — Cela tient à la facilité extrême avec laquelle certains éléments de la gutta deviennent de la résine pure.

Le caoutchouc, la gutta-percha, la résine sont des corps extrêmement voisins les uns des autres ; tous

avait séjourné dans l'eau salée, puis ne
resté en contact de l'air, en dernier lieu ta,
qui était plongé dans l'eau ordinaire
modifié d'une manière si peu sen
affirmer qu'il se fût même modifié. est

Pour servir de contre-épreuve, et dans
expérience avec une gutta ériques du
mais préparée suivant mon itables résines;
j'indiquerai plus loin; cette jaunâtre, *fusible*
ni dans l'eau chlorurée ane est une résine
avait pas trace de spores , fusible seulement à
de la famille des spores l'est à 100°), soluble
les guttas avariées,

Il faut conclure tré que les laits frais de
1° Qu'une gutta *Balata*, contiennent plus de
l'industrie) est e lait de *Masarandu*, plus
qui agit sans de l'*Isonandra percha* vrai.
peut-être même es arbres celui qui contient
une gutta d mposition est :
une condition
d'infiniment

. . . .	63 p. 100
. . . .	16 —
. . . .	21 —

(Il serait
électriq e, suivant l'espèce :
d'un
rieure

. . . .	74 à 80 p. 100
. . . .	15 à 12 —
. . . .	11 à 3 —

2°

es *Mimusops balata* ont une composition
 au ces trois corps, soit :

. . . .	75 à 80 p. 100
. . . .	16 à 12 —
. . . .	6 à 8 —

 faite de l'eau, bien entendu, dans
 es.

bouillir, en agitant, du lait
utta semble disparaître
élangée de charbon.
Balata (écorce),
présence d'un alcali
de 48 heures, on fait
ir retiré l'écorce, qui est
n lait après expression, on
te de résine noire et cassante,
une forte proportion de charbon.
que, de ces trois corps, *gutta*, *albane*
premier soit le moins stable sous l'in-
la chaleur, que cédant son hydrogène il se
ne en carbone dont les molécules se groupent
ble, si elles ne viennent s'ajouter à celles de
ane et de la fluavile pour en former des polycar-
ures d'hydrogène nouveaux.

Certes, je ne suis pas assez compétent en chimie pour affirmer que ce sont bien là les réactions qui se passent, mais il me semble que ces théories sont soutenables en présence des expériences que j'ai maintes fois répétées : car au début, c'est toujours par la chaleur que je m'entêtais à chercher la solution du problème que je m'étais posé.

Action des microbes. — N'est-ce pas une réaction, peut-être bien voisine, qui se passe sous l'influence de ces microbes qui colonisent dans les mauvaises planches? Au bout de plusieurs mois, de plusieurs années, la gutta provenant du Balata s'est altérée, elle est devenue cassante et a perdu en partie son élasticité : en un mot, elle est devenue *résineuse;* il semble donc que l'élément appelé *gutta* par Payen soit le seul qui se soit modifié, l'albane et la fluavile étant restées

sont des hydrocarbures, et la notation chimique ne permet pas d'indiquer dans la gutta où finit la gutta, où commence la résine. M. Payen l'a parfaitement indiqué : des trois principes immédiats qu'il trouve dans la gutta-percha, un seul, qu'il appelle *gutta*, est blanc, opaque, élastique, insoluble dans l'éther et dans l'alcool ; les deux autres, cependant isomériques du premier, la *fluavile* et l'*albane* sont de véritables résines ; la fluavile est cassante, diaphane, jaunâtre, *fusible* à 50°, soluble dans l'éther ; l'albane est une résine blanche, cassante, cristallisable, fusible seulement à 160° (la *gutta* proprement dite l'est à 100°), soluble dans l'éther et dans l'alcool.

L'analyse chimique a montré que les laits frais de *Pindare*, de *Marima* et de *Balata*, contiennent plus de *fluavile* et d'*albane* que le lait de *Masarandu*, plus que la gutta-percha venant de l'*Isonandra percha* vrai.

Le *Marima* est de tous ces arbres celui qui contient le plus de fluavile : sa composition est :

Gutta	63	p. 100
Albane	16	—
Fluavile	21	—

Le *Masarandu* donne, suivant l'espèce :

Gutta	74 à 80	p. 100
Albane	15 à 12	—
Fluavile	11 à 3	—

Le *Pindare* et le *Mimops balata* ont une composition à peu près analogue en ces trois corps, soit :

Gutta	75 à 80	p. 100
Albane	16 à 12	•
Fluavile	6 à 8	—

Abstraction est faite de l'eau, bien entendu, dans ces expériences.

Eh bien! lorsqu'on fait bouillir, en agitant, du lait de marima, presque toute la gutta semble disparaître et se transformer en une résine mélangée de charbon.

Quand on traite du bois frais de Balata (écorce), avec deux fois son poids d'eau en présence d'un alcali et quand, après une macération de 48 heures, on fait bouillir la liqueur après avoir retiré l'écorce, qui est à peu près épuisée de son lait après expression, on obtient encore une sorte de résine noire et cassante, devant sa couleur à une forte proportion de charbon.

Il semble donc que, de ces trois corps, *gutta*, *albane* et *fluavile*, le premier soit le moins stable sous l'influence de la chaleur, que cédant son hydrogène il se transforme en carbone dont les molécules se groupent ensemble, si elles ne viennent s'ajouter à celles de l'albane et de la fluavile pour en former des polycarbures d'hydrogène nouveaux.

Certes, je ne suis pas assez compétent en chimie pour affirmer que ce sont bien là les réactions qui se passent, mais il me semble que ces théories sont soutenables en présence des expériences que j'ai maintes fois répétées : car au début, c'est toujours par la chaleur que je m'entêtais à chercher la solution du problème que je m'étais posé.

Action des microbes. — N'est-ce pas une réaction, peut-être bien voisine, qui se passe sous l'influence de ces microbes qui colonisent dans les mauvaises planches? Au bout de plusieurs mois, de plusieurs années, la gutta provenant du Balata s'est altérée, elle est devenue cassante et a perdu en partie son élasticité : en un mot, elle est devenue *résineuse;* il semble donc que l'élément appelé *gutta* par Payen soit le seul qui se soit modifié, l'albane et la fluavile étant restées

ce qu'elles étaient, des résines propres. C'est bien là ce qui se passe dans les planches de qualité inférieure que j'avais préparées et que j'ai étudiées, celles précisément où les micro-organismes colonisaient : la gutta propre disparaissait et les résines augmentaient; il semble donc que ce soit seule cette gutta propre de Payen qui soit le siège des fermentations.

Il serait intéressant de vérifier ce fait sur des guttas plus vieilles, qui aient gardé pendant trois, quatre ans, l'aspect et la qualité de bonnes guttas, puis qui se soient altérées; il serait intéressant de savoir lequel des trois corps isomères de Payen a été le siège de modifications moléculaires, si c'est bien la gutta propre, ainsi que j'en ai la conviction.

Lorsque, dans l'industrie, on achète une gutta, le point capital que l'on remarque est la proportion qu'elle contient de résine : on la fait bouillir avec de la potasse, on la malaxe lentement, longuement avec les doigts, on la pétrit avec les dents, et on s'assure alors si elle est ou si elle n'est pas collante. Les industriels vous disent : « Nous n'achetons pas de gutta qui contienne plus de *tant pour cent* de résine », car ils savent empiriquement que la présence seule d'une notable proportion de résine rendra impropre toute gutta au service; et j'ajoute ce fait, qu'ils ignorent sans doute : *c'est que cette quantité de résine ne fera que s'accroître avec le temps.*

Une autre cause dans l'impossibilité d'une bonne coagulation par la chaleur, pour certains laits, tels que ceux du *Pindare*, du *Marima* et du *Balata*, réside sans doute dans ce fait que la fluavile dont ils contiennent une forte proportion fond à 50°; par conséquent, dès qu'on a atteint cette température, on peut

admettre que le magma se décompose avant de s'être complètement agglutiné. En effet, faisant évaporer ces laits vers 40° et 50°, c'est-à-dire par une évaporation douce, j'ai pu obtenir de bonnes guttas, ce qui n'arrivait jamais quand je poussais le feu un peu vivement. Dans le premier cas, j'obtenais un magma d'un blanc rosé très beau, dans le second, une poix noire très collante, puis cassante dès le refroidissement obtenu.

Pour en finir avec les trois corps de Payen constitutifs de la gutta, je pose donc ce principe : *la gutta proprement dite de Payen semble être le lieu d'élection et d'habitation des micro-organismes, qui seraient sans action sur l'albane et sur la fluavile, véritables résines.*

Nature des microbes. — Mais ces micro-organismes, quels sont-ils? En un mot, la gutta-percha viciée a-t-elle son microbe spécifique, ou y a-t-il plusieurs êtres infiniment petits qui concourent à la modification de sa structure?

Je l'ai dit, j'ai trouvé sur des guttas altérées une foule d'êtres divers : des spores d'abord, puis des anguillules, des virgulines, des bacilles, les unes filiformes, les autres fusiformes, des mycéliums, des algues, êtres qui indiquaient tous un travail destructif très dense, une vie parasitaire, infime, très développée ; en un mot, un terrain de culture excellent pour une grande variété d'existences diverses. Leur étude détaillée m'entraînerait trop loin, hors du cadre de ce travail.

Mais y a-t-il un microbe spécifique, qui serait ce que le microderma est au vinaigre, le bacille de Koch à la tuberculose, celui d'Eberth à la fièvre typhoïde? Je crois déjà pouvoir dire *oui* hardiment.

Oui, les modifications moléculaires de la gutta-percha qui font le désespoir des électriciens et sont le point noir de la télégraphie sous-marine, ces modifications sont dues à une *bactérie spéciale*, que je crois très vivace, sécrétant la toxine qui dissocie et attaque les molécules de la gutta et dont les spores me paraissent très résistantes sitôt la fermentation commencée.

C'est dans le lait seul, très frais, au moment où on vient de le prendre, qu'on peut les atteindre et les détruire à jamais.

Je crois avoir trouvé cette bactérie, mais mes études ne sont pas complètes, je n'ai pas eu le temps d'en pratiquer la culture suffisamment, bien qu'elle s'ensemence très bien sur l'agar-agar, parce que c'est à son origine, dans le lait frais, qu'il faut la prendre pour en bien suivre et en bien comprendre plus tard l'évolution; je remets donc cette description à un travail ultérieur qui sera, je crois, complet.

Aseptie nécessaire, mais impraticable. — J'ajoute ce fait d'observation personnelle, que la stérilisation, l'aseptie du lait frais lui-même avant toute coagulation, ne suffit pas pour protéger ultérieurement la gutta de l'ensemencement bactéridien. C'est pendant tout le temps que dure la coagulation, même assez longtemps après, qu'il faudrait continuer cette aseptie; pendant tout le temps que la gutta, même coagulée, perd son eau en quantité notable. En effet, une fois le magma obtenu, la gutta est loin d'être finie; elle contient encore une forte proportion d'eau qui s'évapore lentement pendant quelques semaines.

La première quinzaine, la gutta nouvelle perd 20 p. 100 de son poids; environ 10 p. 100 la seconde quinzaine; puis le travail de déshydratation diminue

beaucoup, de sorte qu'au bout de quatre ou cinq mois, la gutta a perdu de 35 à 38 p. 100 de son poids primitif. Elle perd environ 40 p. 100 au bout d'un an.

Il est impossible, dans la pratique, de continuer l'aseptie pendant un temps aussi long, bien que, si elle pouvait être continuée, on pût affirmer que la gutta ne se modifiera plus, n'étant pas infectée.

Il faut recourir à l'antiseptie. — C'est donc à l'antiseptie qu'il faut recourir : il faut antiseptiser le lait frais, y introduire un microbicide qui restera dans la planche, la pénétrera intimement et la rendra réfractaire aux bactéries, sinon indéfiniment, du moins jusqu'au point où l'évaporation sera complète.

Y a-t-il un agent antiseptique capable de tuer le germe spécifique seul de la maladie de la gutta, si ce germe existe bien, ainsi que je le crois? C'est probable, mais mes expériences n'ont pas porté jusque-là. Ce serait évidemment le *summum* des *desiderata :* trouver le spécifique, et mieux le coefficient de sa toxicité pour le microbe, la guttéine n'étant elle-même pas attaquée.

L'antiseptique spécifique est inutile. — Mais je n'ai pas poussé aussi loin la solution du problème, du moins encore. Si, dans l'être vivant, en effet, il est nécessaire de tuer le germe sans tuer le tissu, le problème est parfois difficile à résoudre, à cause de la délicatesse, de la fragilité de ce tissu, car il arrive que l'agent suffisamment toxique pour tuer le contage, par exemple, ne l'est parfois qu'à la dose où il est aussi très toxique pour le tissu ou pour l'individu, la grosse difficulté étant de tuer le contage sans tuer le tissu ou l'individu; et c'est précisément pour tourner la question qu'on cherche l'atténuation des virus.

Mais en est-il de même pour un corps aussi simple qu'un hydrocarbure comme la gutta? Il serait puéril de le soutenir, car on sait bien le contraire.

C'est pourquoi j'agite à dessein la question, car la critique peut soulever l'objection suivante : « Vous ne cherchez qu'un antiseptique général détruisant tout corps organisé, empêchant même des spores venus de l'extérieur de se fixer sur votre gutta; spores qui, dites-vous, sont la cause de l'altération des guttas. C'est fort bien. Mais êtes-vous bien certain que cet antiseptique puissant soit lui-même sans action sur la structure intime de la gutta et ne lui enlève pas une partie de sa résistance, de sa solidité, de son élasticité, de *son nerf*, en un mot?

Cela revient à poser la question de la façon suivante : Un agent chimique ordinaire pénétrant les glomérules, les séparant même de leur liquide suspensif comme un agent mécanique (et ceci est la coagulation), a-t-il une influence sur la gutta?

Les antiseptiques sont sans action sur la qualité de la gutta. — Or, précisément, la gutta est un corps très résistant, très fixe sous l'action des agents inorganiques; peu de corps chimiques l'attaquent : les alcalis et les acides sont pour la plupart sans action sur elle. Seuls, quelques corps très peu nombreux y ont une influence : le sulfure de carbone, le chloroforme, l'essence de térébenthine...; ces corps la dissolvent, mais il *est prouvé* que de la gutta ayant été dissoute dans un de ces corps, si on évapore celui-ci, on retrouve la gutta avec toutes ses propriétés initiales, que souvent même elle devient meilleure et plus stable après cette opération. Exemple, la vulcanisation.

Je m'en suis, du reste, assuré avec soin ; l'action des antiseptiques les plus actifs, tels que le sublimé corrosif, la créosote de hêtre, le chlorure de zinc, l'acide phénique et tous les dérivés de la série aromatique (acide salicylique, salol, lysol, bétol), l'iodoforme, etc., etc., non seulement ne font rien perdre à la gutta de ses qualités, mais encore augmentent ces qualités, et cela se comprend si on admet qu'une bonne gutta (celle des Isonandras, par exemple) peut être réfractaire au bacille spécifique, mais peut être aussi, quant à sa surface, le siège d'une foule d'autres microorganismes qui, bien que n'attaquant pas sa fibre, ne sont pas sans influence nocive pour sa surface.

Je l'affirme donc parce que l'expérience me l'a prouvé ; une gutta traitée par un antiseptique mêlé au lait est une gutta de première qualité, d'une durée qui paraît indéfinie, d'apparence supérieure à la meilleure gutta provenant d'*Isonandras* de choix.

Tout arbre produisant une gutta-percha quelconque, cette gutta sera bonne si elle est bien préparée, *grâce à une coagulation rapide et à l'antiseptie*.

Je dirai plus loin comment pour tout lait guttigène *quelconque*, si liquide soit-il, je produis cette coagulation rapide, et comment j'en pratique l'antiseptie au temps même de l'opération.

Je vais dire quelques mots de l'habitat des arbres à gutta dans l'Amérique du Sud.

MORISSE.

(*La suite à la prochaine livraison.*)

CHRONIQUE.

Rapport de la Commission d'examen des propositions de l'« American institute » en vue du congrès de Chicago.

I. — *Ratification des unités, termes, symboles arrêtés dans les précédents congrès.*

La Commission pense qu'il est extrêmement désirable a tous les points de vue de ne pas changer les décisions des précédents congrès, à moins qu'il n'y ait eu ou contradiction ou erreur.

Chaque congrès est intéressé à respecter les décisions des congrès antérieurs pour qu'on respecte ses propres décisions.

II. — *Dénomination de quelques grandeurs.*

Dans la formation des mots nouveaux, la Commission conseille d'employer, autant que possible, la terminaison *ance* pour désigner les grandeurs qui concernent un conducteur ou, plus généralement, un corps pris dans toute son étendue (exemple : résistance ou conductance d'un conducteur électrique), et de réserver la terminaison *ité* pour les grandeurs qui caractérisent les propriétés de la matière dont les corps sont formés. Ainsi la résistibilité ou la conductibilité serait la résistance spécifique ou la conductance spécifique.

La Commission estime que les expressions de *coefficient de self-induction* et de *coefficient d'induction* mutuelle sont employées depuis longtemps sans ambiguïté et qu'il n'y a pas de raison de les changer.

Il en est de même pour les termes de *perméabilité* et de *susceptibilité* magnétique introduits dans la science par lord Kelvin et employés par tous les électriciens.

Conformément à l'opinion de l'Américan Institute, la Commission est d'avis qu'il convient d'appeler *réluctance* ce qu'on a appelé jusqu'ici *résistance magnétique;* à savoir $\int_0^l \frac{dl}{\mu s}$,

l représentant la longueur du conducteur magnétique dans le sens des lignes de force, s sa section droite et μ sa perméabilité.

La Commission propose de donner un nom à la grandeur dont le carré ajouté au carré de la résistance d'un circuit traversé par un courant périodique donne le carré de sa résistance apparente. Le nom de *réactance* pourrait convenir à cette grandeur.

La *force électromotrice imprimée* (impressed), d'après la définition donnée par le Comité de l'American Institute, ne semble pas différer de la force électromotrice réelle dont le circuit est le siège à chaque instant.

Quant au mot *voltage*, il s'est introduit dans la pratique industrielle et doit être conservé; mais il paraît inutile de le substituer d'une façon générale à *différence de potentiel.*

III. — *Propositions faites pour la création de nouvelles unités pratiques ou pour de nouvelles désignations d'unités pratiques.*

Au sujet du mot *henry* qu'on propose de substituer au mot *quadrant*, défini par le congrès de 1889 pour l'unité pratique de coefficient de self ou mutuelle induction, la Commission se réfère au principe de ne pas changer ce qui a été décidé par un congrès antérieur.

Le nom de *mho*, proposé par lord Kelvin, paraît avantageux pour désigner l'inverse de l'ohm, c'est-à-dire, l'unité pratique de conductance.

Le choix d'une unité pratique d'éclairement, qui serait l'éclairement produit par la bougie décimale sur une surface placée à 1 mètre normalement aux rayons lumineux, répond à un besoin. Quelques objections ont été soulevées à propos de l'expression *bougie-mètre* appliquée à cette unité.

L'avis de la Commission n'est pas favorable à la création des unités pratiques de force magnéto-motrice, d'intensité de champ magnétique et de flux magnétique proposées par le Comité de l'American Institute.

L'unité pratique de force magnéto-motrice proposée, sous le nom de *Gilbert*, comme valant 10^{-1} unités C. G. S., est beaucoup trop petite; par contre, les unités pratiques d'intensité

de champ magnétique et de flux magnétique, proposées sous les noms de *Gauss* et de *Weber*, comme valant 10^8 unités C. G. S., sont beaucoup trop grandes.

L'emploi du gilbert présenterait, il est vrai, l'avantage de donner avec cette unité le résultat du calcul de la force magnéto-motrice par la formule $4\pi n i$ quand l'intensité i du courant est exprimée en ampères.

L'emploi du gauss présenterait aussi l'avantage qu'en exprimant avec cette unité l'intensité du champ magnétique H, la force électromotrice d'induction E développée aux extrémités d'un fil de l centimètres de longueur, placé perpendiculairement aux lignes de force, les coupant normalement avec une vitesse vCS serait exprimé en volt par la formule $E = Hlv$.

Mais l'emploi simultanée du gilbert et du gauss pourrait conduire, dans les calculs, à des erreurs par l'oubli d'un facteur 10^9, dans le cas où l'on voudrait calculer une intensité de champ magnétique en divisant la force magnéto-motrice par la longueur du tube d'induction considéré; en évaluant en gilbert la force magnéto-motrice et en centimètres longueur, l'intensité magnétique serait donnée avec une unité valant 10^{-1} C. G. S. et non 10^8; il faudrait donc diviser, en outre, le résultat par 10^9 pour avoir l'intensité exprimée en gauss.

Il paraît donc plus sage de ne pas introduire ces nouvelles unités incommodes par leur grandeur et dangereuses pour l'exactitude des calculs.

Du reste, dans la pratique, la force magnéto-motrice est spécifiée par le nombre d'ampères-tours; c'est une expression qui parle aux yeux et dont la conversion en unités G. G. S. se fait très facilement.

IV. — *Définir et adopter* : 1° *des moyens de matérialiser les unités pratiques principales par des étalons capables d'être facilement reproduits;* 2° *des noms pour ceux-ci et pour les unités théoriques à l'aide desquels on puisse les distinguer les uns des autres.*

La modification de l'ohm légal proposé par le Comité de l'American Institute est une question du domaine diplomatique, et qui ne peut être résolue par le Congrès.

A cet égard, pourtant, la Commission reconnaît que, dans une nouvelle définition de l'ohm pratique, il conviendra de remplacer la définition de la section, dont la mesure est irréalisable, par l'indication de la masse de mercure contenue dans la longueur de l'ohm.

La conférence de 1884 n'a pas jugé bon de matérialiser l'ampère et le volt, comme elle l'a fait pour l'ohm ; sur la proposition de lord Kelvin, l'ampère est resté défini comme le dixième de l'unité d'intensité C. G. S., et le volt comme la force électromotrice qui soutient un ampère dans un ohm.

L'avis unanime de la commission est qu'il n'y a pas lieu de revenir sur cette décision.

On a très bien fait de définir un étalon de résistance sous le nom d'*ohm légal*, parce qu'on peut faire des étalons de résistance qui restent semblables à eux-mêmes et qui se comparent entre eux avec une grande précision, tandis que la détermination en valeur absolue d'une résistance est une opération extrêmement longue, délicate et susceptible d'une précision bien moindre.

Il en est tout autrement pour les courants et les forces électromotrices.

La détermination directe de l'intensité d'un courant en valeur absolue par l'emploi d'un électro-dynamomètre-balance est une opération rapide et précise quand l'électro-dynamomètre a été construit avec les soins convenables pour en faire un instrument-type, ou quand sa constante a été déterminée par comparaison avec celle d'un de ces derniers instruments. Au contraire, la détermination de l'intensité d'un courant par la pesée d'un dépôt électrolytique est une opération longue, minutieuse et susceptible d'une précision beaucoup moindre. Si l'on définissait par l'électrolyse un étalon d'intensité (*ampère-étalon*), on obtiendrait avec plus de difficulté et moins d'exactitude l'intensité d'un courant en ampère-étalon qu'en ampère vrai : une semblable définition est donc inutile.

La commission ne méconnaît pas, du reste, la grande importance des recommandations du récent rapport du Board of Trade sur le moyen d'obtenir le plus exactement possible l'intensité d'un courant, en se fondant sur ce qu'un ampère dépose par seconde $0^{g},001118$ d'argent (à 1/1000 près). Cela

permet de se dispenser d'avoir un électro-dynamomètre-balance quand on ne désire pas avoir une précision supérieure à 1/500.

Quant à ce qui concerne la matérialisation du volt, aucun élément de pile ne conserve une force électromotrice constante au degré de précision avec lequel on peut obtenir cette force électromotrice, en la comparant à la différence de potentiel déterminée par un courant connu passant dans une résistance connue, opération qui est facile et rapide. Un Élément de pile ne peut donc servir d'étalon que temporairement, et en tenant compte des variations dues à la température.

La commission ne croit pas bon non plus de fonder un étalon de bougie décimale sur l'emploi d'une lampe à acétate d'amyle. L'étude de ces lampes a montré qu'elles ne sont pas suffisamment constantes et que la lumière n'en est pas assez blanche.

Comme le comité de l'American Institute, la commission n'est pas d'avis de créer un étalon de conductibilité.

A ce propos, elle recommande d'indiquer commercialement les qualités d'un métal, au point de vue de sa conductibilité, par la résistance d'un fil de ce métal ayant 100 mètres de long et pesant un kilogramme.

V. — *Définitions de quelques expressions.*

La commission rappelle que les termes de *pôle nord* et de *pôle sud* pour les aimants ont déjà été adoptés par le congrès de 1889.

En ce qui concerne les courants alternatifs, les expressions de courants simples, diphasés, triphasés, etc..., polyphasés, sont uniformément usitées, il y a lieu de les conserver.

VI. — *Système international de notations et de symboles.*

Vu la diversité des langues, la commission estime que les propositions à cet égard, ne peuvent être utilement faites que devant le congrès.

(*Bull. de la Soc. Intern. des Électriciens.*)

L'Éd.-Gérant, DUNOD. — PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

ANNALES

TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1893 Juillet-Août

NOUVEL EXPOSÉ

DE LA

THÉORIE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES

1. *Possibilité* a priori *de l'explication des actions électriques et magnétiques par l'intervention de deux systèmes de forces à distance.* — Dans une précédente note (mai-juin 1893), nous avons montré que l'on peut établir la théorie de l'électrostatique sans s'appuyer aucunement sur l'hypothèse de la théorie ordinaire, qui consiste à admettre l'existence de masses électriques agissant les unes sur les autres suivant la loi de Coulomb. Du seul fait qu'un champ électrostatique admet un potentiel uniforme V, il résulte que ce champ est identique à celui que produiraient des masses électriques réparties suivant la loi exprimée par les

formules :

$$(1)\quad \begin{cases} 4\pi\rho = -\left(\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2}\right) \\ \qquad = \frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz}; \end{cases}$$

$$(2)\quad 4\pi\sigma = -\left(\frac{dV}{dn}\right)_1 - \left(\frac{dV}{dn}\right)_2 = f_{n_1} + f_{n_2}.$$

Ce résultat est, non point une hypothèse, mais une identité mathématique d'une rigueur absolue. Les masses électriques sont pour nous purement et simplement des quantités mathématiques définies par les formules (1) et (2), et il n'est nullement nécessaire de leur attribuer une existence matérielle et la propriété d'exercer des actions à distance.

Une explication analogue s'applique à ce que l'on appelle les masses magnétiques.

Lorsqu'il n'existe pas de potentiel, — par exemple dans le cas d'un champ électrique ou magnétique variable d'un instant à l'autre, ou même dans le cas d'un champ magnétique créé par un courant permanent, — il n'est plus possible de trouver une distribution de masses qui, produisant des forces centrales en raison inverse du carré ou d'une puissance quelconque de la distance, donneraient naissance à un champ identique à celui qui existe; car ces forces centrales admettent un potentiel. Mais on peut chercher à constituer un champ identique à celui qui existe, en combinant deux systèmes de forces :

1° Un système de forces centrales dues à une certaine répartition de masses et obéissant à la loi de Coulomb; 2° un nouveau système de forces dues à des *masses vectorielles* et obéissant à la loi de Laplace (relative à l'action hypothétique d'un élément de

courant sur un pôle d'aimant). Nous allons définir la force due à une masse vectorielle.

Soit μ un vecteur mm' (*fig.* 1) appliqué à un point m et auquel nous donnerons le nom de *masse vectorielle.* La force f développée par cette masse vectorielle (sur une masse électrique ou magnétique, suivant les cas) en un point M sera, *par définition :* 1° égale à $\frac{\mu \sin \theta}{r^2}$, r désignant la distance mM et θ l'angle $\widehat{\mathrm{M}mm'}$; 2° dirigée perpendiculairement au plan Mmm' dans un sens tel que, — pour un observateur placé le long du vecteur mm', les pieds en m et la tête en m', et regardant le point M, — la force f soit dirigée vers la gauche du plan Mmm'.

Fig. 1.

Cette force f, n'étant point dirigée suivant la droite Mm, ne peut obéir au principe de l'égalité de l'action et de la réaction. Il y aurait là une grave objection si l'on voulait considérer la possibilité de l'existence d'une telle force; mais nous ne nous occupons ici que de forces *fictives* équivalentes à celles du champ étudié.

Ceci posé, nous allons démontrer le théorème suivant :

Dans un champ électrique (ou magnétique) quelconque, constant ou variable, à un instant quelconque t *la répartition de la force électrique (ou magnétique)* f *aux divers points est identique à la répartition de la force que développerait l'ensemble : 1° d'un système de masses électriques (ou magnétiques) agissant à distance suivant la loi de Coulomb; 2° d'un système de masses vectorielles électriques (ou magnétiques) agissant à distance suivant la loi de Laplace* $\left(\mathrm{f} = \frac{\mu \sin \theta}{\mathrm{r}^2}\right)$.

2. *Démonstration du théorème précédent.* — Considérons, par exemple, un champ électrique. Soient X, Y, Z les composantes de la force électrique f suivant trois axes rectangulaires. Nous supposerons, pour simplifier un peu la démonstration, que les dérivées secondes de X, Y, Z par rapport aux coordonnées x, y, z ne présentent pas de discontinuité.

Il suffit évidemment de borner la démonstration au cas d'un champ E, d'étendue aussi grande que l'on voudra, limité par une surface fermée S (*fig.* 2).

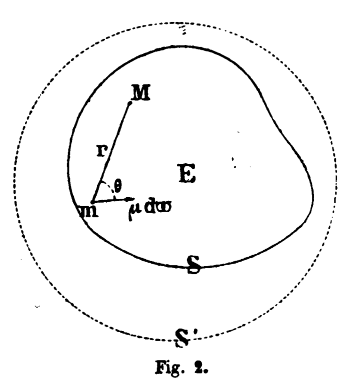


Fig. 2.

Étudions, tout d'abord, la force électrique f_1 que créerait un système de masses vectorielles électriques réparties dans l'espace E. Soit $\mu\, d\varpi$ la masse vectorielle contenue dans un volume infiniment petit $d\varpi$ pris autour d'un point $m(\alpha, \beta, \gamma)$, μ désignant la densité de cette masse au point m. La force électrique développée en un point $M(x, y, z)$ par ce vecteur $\mu\, d\varpi$ est égale, d'après sa définition, à $\dfrac{\mu\, d\varpi \sin\theta}{r^2}$; et, si l'on tient compte de la direction et du sens de cette force, ses composantes suivant les axes de coordonnées seront (en désignant par μ_x, μ_y, μ_z les composantes de μ) :

$$\frac{(\gamma - z)\mu_\beta - (\beta - y)\mu_\gamma}{r^3}\, d\varpi; \quad \frac{(\alpha - x)\mu_\gamma - (\gamma - z)\mu_\alpha}{r^3}\, d\varpi;$$

$$\frac{(\beta - y)\mu_\alpha - (\alpha - x)\mu_\beta}{r^3}\, d\varpi.$$

La force résultante f_1 au point M aura donc pour

composantes :

$$(3)\quad X_1 = \iiint_{E'} \frac{(\gamma - z)\mu_\beta - (\beta - y)\mu_\gamma}{r^3} d\alpha\, d\beta\, d\gamma, \quad Y_1 = \ldots, \quad Z_1 = \ldots$$

en remplaçant $d\varpi$ par le volume $d\alpha\, d\beta\, d\gamma$ d'un parallélipipède rectangle, et étendant l'intégration soit à l'espace E, soit à un espace E′ plus étendu et limité par une surface S′ (*fig.* 2), ce qui revient au même puisque $\mu_\alpha, \mu_\beta, \mu_\gamma$ sont nuls en dehors du champ E.

Si l'on remarque que l'on a :

$$r^2 = (\alpha - x)^2 + (\beta - y)^2 + (\gamma - z)^2,$$

d'où :

$$\frac{dr}{dx} = -\frac{dr}{d\alpha} = -\frac{\alpha - x}{r} \quad \frac{dr}{dy} = \ldots \quad \frac{dr}{dz} = \ldots$$

on trouve :

$$\frac{dX_1}{dx} = \iiint_{E'} [(\gamma - z)\mu_\beta - (\beta - y)\mu_\gamma] \frac{d\left(\frac{1}{r^3}\right)}{dx} d\alpha\, d\beta\, d\gamma$$

$$= \iiint_{E'} \frac{3}{r^5}(\alpha - x)[(\gamma - z)\mu_\beta - (\beta - y)\mu_\gamma]\, d\alpha\, d\beta\, d\gamma.$$

En calculant de même $\dfrac{dY_1}{dy}$ et $\dfrac{dZ_1}{dz}$ et ajoutant, on aura identiquement :

$$(4)\qquad \frac{dX_1}{dx} + \frac{dY_1}{dy} + \frac{dZ_1}{dz} = 0.$$

D'autre part les équations (3) peuvent s'écrire :

$$X_1 = \iiint_{E'} \left[\mu_\gamma \frac{d\left(\frac{1}{r}\right)}{d\beta} - \mu_\beta \frac{d\left(\frac{1}{r}\right)}{d\gamma}\right] d\alpha\, d\beta\, d\gamma \quad Y_1 = \ldots \quad Z_1 = \ldots$$

ou, par une transformation d'intégrale bien connue

$$X_1 = \iint_{S'} \frac{1}{r}(\mu_\gamma\, d\alpha\, d\gamma - \mu_\beta\, d\alpha\, d\beta) - \iiint_{E'} \frac{1}{r}\left(\frac{d\mu_\gamma}{d\beta} - \frac{d\mu_\beta}{d\gamma}\right) d\alpha\, d\beta\, d\gamma$$

et comme $\mu_\alpha, \mu_\beta, \mu_\gamma$ sont nuls sur la surface S' :

$$X_1 = -\iiint_{E'} \frac{1}{r}\left(\frac{d\mu_\gamma}{d\beta} - \frac{d\mu_\beta}{d\gamma}\right) d\alpha\, d\beta\, d\gamma \quad Y_1 = \dots \quad Z_1 = \dots$$

On déduit de là :

$$\begin{aligned} \frac{dY_1}{dz} &= -\iiint_{E'} \frac{d\left(\frac{1}{r}\right)}{dz}\left(\frac{d\mu_\alpha}{d\gamma} - \frac{d\mu_\gamma}{d\alpha}\right) d\alpha\, d\beta\, d\gamma \\ &= \iiint_{E'} \frac{d\left(\frac{1}{r}\right)}{d\gamma}\left(\frac{d\mu_\alpha}{d\gamma} - \frac{d\mu_\gamma}{d\alpha}\right) d\alpha\, d\beta\, d\gamma \\ &= \iint_{S'} \frac{1}{r}\left(\frac{d\mu_\alpha}{d\gamma} - \frac{d\mu_\gamma}{d\alpha}\right) d\alpha\, d\beta \\ &\quad - \iiint_{E'} \frac{1}{r}\frac{d}{d\gamma}\left(\frac{d\mu_\alpha}{d\gamma} - \frac{d\mu_\gamma}{d\alpha}\right) d\alpha\, d\beta\, d\gamma. \end{aligned}$$

En calculant de même $\frac{dZ_1}{dy}$ et remarquant que $\frac{d\mu_\alpha}{d\gamma}$, $\frac{d\mu_\gamma}{d\alpha}$,... sont nuls sur la surface S', on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{dY_1}{dz} - \frac{dZ_1}{dy} = &-\iiint_{E'} \frac{1}{r}\left[\frac{d^2\mu_\alpha}{d\alpha^2} + \frac{d^2\mu_\alpha}{d\beta^2} + \frac{d^2\mu_\alpha}{d\gamma^2}\right] d\alpha\, d\beta\, d\gamma \\ &+ \iiint_{E'} \frac{1}{r}\frac{d}{d\alpha}\left[\frac{d\mu_\alpha}{d\alpha} + \frac{d\mu_\beta}{d\beta} + \frac{d\mu_\gamma}{d\gamma}\right] d\alpha\, d\beta\, d\gamma. \end{aligned}$$

La première des deux intégrales du second membre de cette formule est égale à $4\pi\mu_x$, car, en posant :

$$(5) \qquad \frac{d^2\mu_\alpha}{d\alpha^2} + \frac{d^2\mu_\alpha}{d\beta^2} + \frac{d^2\mu_\alpha}{d\gamma^2} = -4\pi\rho_\alpha,$$

elle prend la forme :

$$4\pi \iiint_{E'} \frac{\rho_\alpha}{r}\, d\alpha\, d\beta\, d\gamma$$

qui représente, au facteur 4π près, le potentiel μ_x d'un champ où les masses auraient au point (α, β, γ) une

densité ρ_α définie en fonction de ce potentiel par l'équation de Poisson (5). On aura donc :

$$(6)\quad \begin{cases} \dfrac{dY_1}{dz}-\dfrac{dZ_1}{dy}=4\pi\mu_x+\displaystyle\iiint_{E'}\frac{1}{r}\frac{d}{d\alpha}\left(\frac{d\mu_\alpha}{d\alpha}+\frac{d\mu_\beta}{d\beta}+\frac{d\mu_\gamma}{d\gamma}\right)d\alpha\, d\beta\, d\gamma \\ \dfrac{dZ_1}{dx}-\dfrac{dX_1}{dz}=4\pi\mu_y+\dots \qquad \dfrac{dX_1}{dy}-\dfrac{dY_1}{dx}=4\pi\mu_z+\dots \end{cases}$$

Si maintenant nous fixons par les formules suivantes les valeurs de $\mu_\alpha, \mu_\beta, \mu_\gamma$, que jusqu'ici nous avons laissées arbitraires :

$$(7)\quad 4\pi\mu_x=\frac{dY}{dz}-\frac{dZ}{dy};\ 4\pi\mu_y=\frac{dZ}{dx}-\frac{dX}{dz};\ 4\pi\mu_z=\frac{dX}{dy}-\frac{dY}{dx};$$

comme il en résulte l'identité :

$$(8)\qquad \frac{d\mu_\alpha}{d\alpha}+\frac{d\mu_\beta}{d\beta}+\frac{d\mu_\gamma}{d\gamma}=0,$$

les relations (6) se réduiront à :

$$(9)\quad \frac{dY_1}{dz}-\frac{dZ_1}{dy}=\frac{dY}{dz}-\frac{dZ}{dy};\ \frac{dZ_1}{dx}-\frac{dX_1}{dz}=\dots\ \frac{dX_1}{dy}-\frac{dY_1}{dx}=\dots$$

En résumé si les masses vectorielles électriques dans le champ E ont une densité μ définie par les équations (7), les composantes de la force électrique f qu'elles développent jouissent des propriétés exprimées par les formules (4) et (9).

Si maintenant l'on pose :

$$X_2=X-X_1 \qquad Y_2=Y-Y_1 \qquad Z_2=Z-Z_1,$$

ces équations définissent une nouvelle force électrique f_2 $(X_2 Y_2 Z_2)$, telle que f est la résultante de f_1 et de f_2. D'après les formules (4) et (9), on aura :

$$(10)\quad \frac{dX_2}{dx}+\frac{dY_2}{dy}+\frac{dZ_2}{dz}=\frac{dX}{dx}+\frac{dY}{dy}+\frac{dZ}{dz}=4\pi\rho$$

$$(11)\quad \frac{dY_2}{dz}-\frac{dZ_2}{dy}=\frac{dZ_2}{dx}-\frac{dX_2}{dz}=\frac{dX_2}{dy}-\frac{dY_2}{dx}=0.$$

Il résulte des équations (11) que f_2 dérive d'un potentiel. Par conséquent, d'après ce qui a été dit dans la précédente note déjà citée, la force électrique additionnelle f_2 est identique à la force que créeraient des masses électriques dont la densité ρ est définie par la formule (10) en fonction de X, Y, Z.

Ainsi la force électrique f en tout point du champ E est identique à la résultante de deux forces f_1 et f_2, dont l'une f_2 serait créée par une certaine distribution de masses électriques et l'autre f_1 par une distribution de masses vectorielles électriques, conformément aux formules (10) et (7), qui définissent les densités ρ et μ.

Le théorème est donc démontré. On remarquera que les formules ci-dessus n'impliquent en elles-mêmes aucune propriété physique et s'appliqueraient à une force f autre qu'une force électrique ou même à un vecteur f quelconque ; les énoncés seuls seraient à modifier.

3. *Application au champ électrique.* — La seule condition que doit remplir un champ pour que le théorème précédent lui soit applicable est qu'il soit caractérisé par l'existence d'un vecteur f bien déterminé en chaque point. Cette condition est remplie, comme nous l'avons vu dans la précédente note, par un champ électrostatique, où le vecteur f est défini par la formule : $F = \mu f$, F désignant la force mécanique que subit une sphère d'épreuve de coefficient μ placée en un point du champ.

Ce vecteur f caractéristique du champ électrique est susceptible de mesure non seulement quand l'état du champ est stable, mais encore lorqu'il varie d'un instant à l'autre. Il est vrai que l'on ne possède pas de méthode expérimentale assez parfaite pour mesu-

rer f en un point M à un instant précis t quand la variation du champ est très rapide. On n'en conçoit pas moins l'existence continue de ce vecteur, quelle que soit la rapidité avec laquelle il varie.

Il résulte du développement de la théorie que les propriétés d'un champ électrique, dans un milieu bien défini, sont entièrement connues quand le vecteur caractéristique f est donné en chacun de ses points; on peut alors calculer la répartition des masses électriques, les forces auxquelles sont soumis les corps électrisés, l'énergie potentielle, etc. En un mot, lorsqu'on connaît la loi de distribution du vecteur f, pour en déduire les propriétés électriques du champ, on n'a pas besoin de rechercher si les masses électriques proviennent d'une machine statique, d'une pile voltaïque ou d'une bobine d'induction, ni si ces masses fictives sont en repos ou en mouvement. Du reste les forces électriques f_1 et f_2 dont la résultante, en vertu du théorème précédent, est égale à f, dépendent des distances r, mais ne font point intervenir les directions ni les vitesses des déplacements des masses.

Le rôle des masses électriques définies dans ce théorème est bien connu par l'étude de l'électrostatique. Mais que sont les *masses vectorielles électriques?* Si les actions électriques dans un champ variable n'étaient pas incomparablement plus difficiles à observer que dans un champ électrostatique, et si les données expérimentales que l'on possède à ce sujet n'étaient pas si restreintes et si peu précises, il est probable qu'en cherchant une explication théorique des phénomènes observés on aurait été conduit à considérer ces masses vectorielles. D'après la théorie actuellement établie sur les bases posées par Maxwell, ces masses vectorielles

ne seraient autre chose que ce que l'on appelle quelquefois des courants magnétiques.

Des considérations analogues pourraient être développées au sujet d'un champ magnétique variable. Il est intéressant d'étudier d'une manière particulière le champ magnétique créé par un courant permanent.

4. *Application au champ magnétique d'un courant permanent.* — Une première étude de l'action d'un courant sur un aimant permet de constater qu'en chaque point du champ existe une force magnétique f bien déterminée en grandeur et en direction et indépendante de la nature de l'aimant employé pour la mesurer. Ce vecteur f est donc bien la caractéristique du champ comme en électrostatique.

Peut-on de plus démontrer que le champ admet un potentiel uniforme? On voit immédiatement que la démonstration faite en électrostatique pour mettre en évidence l'existence d'un potentiel tomberait ici en défaut. En effet, si l'on fait décrire à un pôle d'aimant un chemin fermé en présence du courant, on ne peut plus reconnaitre si le travail total de la force magnétique pendant ce déplacement est nul, puisque, entre le départ et l'arrivée du pôle, l'état des corps a changé, les conducteurs s'étant échauffés aux dépens de la pile et peut-être même par suite du travail effectué.

Puisque nous ne savons rien *a priori* au sujet de l'existence d'un potentiel, nous allons appliquer le théorème du paragraphe 2. L'action exercée sur un aimant en tout point du champ du courant est identique à celle qu'exercerait un système de *masses magnétiques* et de *masses vectorielles magnétiques*. Étant certains à l'avance de ce résultat, nous n'aurons qu'à rechercher la distribution des masses en question.

La simple expérience de Biot et Savart sur l'action magnétique d'un courant rectiligne indéfini suffira entièrement pour nous donner la clef de l'électro-magnétisme, en supposant toutefois cette expérience complétée par celles qu'ont faites d'autres savants pour étudier le champ magnétique à l'intérieur d'un conducteur liquide (*).

Le conducteur est un cylindre dont la section droite est un cercle ABA'B' de rayon a et dont l'axe est la verticale Oz (*fig.* 3); le courant, dirigé de bas en haut, a une intensité totale I. Dans ces conditions l'expérience montre que les lignes de force sont des circonférences ayant pour axe Oz et qu'un pôle d'aimant positif (ou nord) tend à tourner de droite à gauche autour de cet axe.

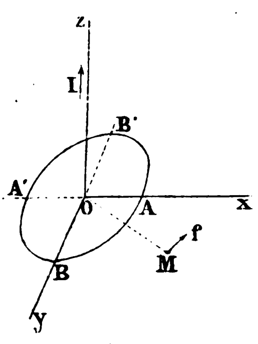


Fig. 3.

En outre la force magnétique f, en un point M, est : 1° proportionnelle à l'intensité I du courant et inversement proportionnelle à la distance r du point M à l'axe, dans tout l'espace extérieur au conducteur :

$$f = \mathrm{A}\frac{\mathrm{I}}{r}; \tag{12}$$

2° proportionnelle à la distance r dans tout l'espace occupé par le conducteur, et variant d'une manière continue lorsqu'on passe de l'extérieur à l'intérieur du cylindre. Si l'on désigne par i la densité $\frac{\mathrm{I}}{\pi a^2}$ du

(*) Voir *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 3 février 1890, note de M. Joubin.

courant, on aura à la surface du conducteur :

$$f = A\pi a i$$

et, par suite, à l'intérieur :

(13) $$f = A\pi r i.$$

Enfin l'expérience montre que la force f et, par conséquent, la constante A sont indépendantes de la nature de la substance conductrice.

Voici l'interprétation de ces résultats. D'abord, d'après la formule (12), les composantes de la force magnétique f, en un point $M(x, y, 0)$, suivant les axes Ox, Oy, Oz (*fig.* 3) sont :

$$X = f\frac{y}{r} = AI\frac{y}{r^2}; \quad Y = -f\frac{x}{r} = -AI\frac{x}{r^2}; \quad Z = 0.$$

L'application des formules (7) et (10) montre que μ et ρ sont nuls, c'est-à-dire que *dans le champ extérieur au conducteur il n'y a ni masses magnétiques, ni masses vectorielles magnétiques.*

En second lieu, d'après la formule (13), les composantes de la force magnétique en un point pris à l'intérieur du conducteur sont :

$$X = f\frac{y}{r} = A\pi i y; \quad Y = -f\frac{x}{r} = -A\pi i x; \quad Z = 0.$$

Les formules (7) et (10) donnent dans ce cas :

$$\begin{cases} \mu_x = \mu_y = 0 \quad \mu = \mu_z = \dfrac{A}{2}\, i. \\ \rho = 0. \end{cases}$$

Le conducteur ne contient donc pas de masses magnétiques proprement dites ($\rho = 0$); *mais il contient des masses vectorielles magnétiques dirigées dans le même sens que le courant et dont la densité* μ *en chaque point est égale*, au facteur $\frac{A}{2}$ près, *à la densité* i *du courant.* Ajoutons que dans le développement de la

théorie de l'électro-magnétisme, on démontre très simplement que A est une constante absolue indépendante de la nature du milieu. Si les unités sont choisies de telle sorte que A soit égal à 2, il en résulte que μ est précisément égal à i.

Ainsi, tandis que les masses électriques et magnétiques n'ont pas d'autres sens que celui qui résulte de leurs formules de définition, la densité μ de la masse vectorielle magnétique a au contraire une interprétation physique remarquable. Elle se confond en chaque point du champ, — dans le cas d'un courant permanent, seul étudié ici, — avec la densité i du courant. Cette identité, reconnue dans le cas particulier d'un conducteur cylindrique, est en elle-même indépendante de la forme du circuit parcouru par le courant. Elle nous permet, par conséquent, de calculer, sans être obligés de recourir de nouveau à l'expérience, le champ magnétique d'un courant permanent de forme quelconque et de résoudre toutes les questions d'électro-magnétisme. En particulier elle justifie l'emploi de la loi élémentaire de Laplace pour le calcul de l'action d'un courant *fermé* sur un aimant.

La relation (8), à laquelle doit satisfaire la densité μ de la masse vectorielle magnétique, donne lieu à une vérification intéressante. Les composantes μ_x, μ_y, μ_z sont égales respectivement aux composantes i_x, i_y, i_z de la densité i du courant considérée comme vecteur. La condition (8) peut donc s'écrire :

$$\frac{di_x}{dx} + \frac{di_y}{dy} + \frac{di_z}{dz} = 0.$$

Sous cette forme elle exprime que le flux d'électricité pénétrant à l'intérieur d'une surface fermée quelconque est égal au flux qui sort à travers cette surface pendant

le même temps. Or cette propriété appartient bien, comme l'on sait, aux courants permanents.

Une autre propriété importante, celle de l'équivalence d'un courant et d'un feuillet magnétique au point de vue des actions extérieures, peut être démontrée simplement et sans calculs. Imaginons, en effet, une surface fermée S enveloppant complètement un courant I, de telle sorte qu'un chemin fermé extérieur à S ne puisse *embrasser* le courant. Dans l'expace extérieur à S il n'y a pas de courants et, par conséquent, pas de masses vectorielles magnétiques ($\mu = 0$) ; les formules (7) montrent alors que dans cet espace la force magnétique (X, Y, Z) dérive d'un potentiel uniforme. Il en résulte que le champ magnétique extérieur à S est identique à celui qui serait développé par une simple distribution convenable de masses magnétiques. Si l'on amène la surface S à prendre la forme d'un feuillet, on voit qu'une distribution magnétique bien determinée à l'intérieur de ce feuillet produirait un champ équivalent à celui du courant.

5. *Application aux mouvements vibratoires d'un corps élastique.* — La digression que nous faisons ici a pour but de mieux faire comprendre que le théorème du paragraphe 2 n'est point spécial aux forces électriques et magnétiques. Elle ne suppose nullement, du reste, la connaissance de la théorie de l'élasticité.

Considérons un corps élastique dont les diverses molécules vibrent suivant une loi quelconque. A un instant donné t, l'état du corps sera parfaitement déterminé si l'on connaît le déplacement qu'a subi chaque molécule à partir de sa position initiale. Soient u, v, w les composantes, suivant trois axes, du déplacement (supposé très petit) d'une molécule située

primitivement au point $M(x, y, z)$; u, v, w sont des fonctions de x, y, z et du temps t. Les composantes de l'accélération de cette molécule sont $\frac{d^2u}{dt^2}, \frac{d^2v}{dt^2}, \frac{d^2w}{dt^2}$. Cette accélération peut être considérée comme l'expression de la force f qui agit, à l'époque t, sur l'unité de masse du corps au point M; les composantes de cette force sont donc :

$$X = \frac{d^2u}{dt^2}; \quad Y = \frac{d^2v}{dt^2}; \quad Z = \frac{d^2w}{dt^2}.$$

En vertu du théorème du paragraphe 2, il est possible de trouver une distribution de masses, vectorielles ou non, *d'une nature spéciale*, qui, agissant à distance sur l'unité de masse au point M, les unes suivant la loi de Coulomb, les autres suivant la loi de Laplace, produiraient une force résultante identique à f. Les densités ρ et μ de ces masses en chaque point du corps sont définies par les formules (10) et (7), qui prennent la forme :

$$\left\{\begin{aligned} 4\pi\rho &= \frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz} = \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz}\right) = \frac{d^2\theta}{dt^2} \\ 4\pi\mu_x &= \frac{dY}{dz} - \frac{dZ}{dy} = \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{dv}{dz} - \frac{dw}{dy}\right); \quad 4\pi\mu_y = \ldots \quad 4\pi\mu_z = \ldots \end{aligned}\right.$$

Ainsi la densité de masse ρ, au facteur 4π près, est égale, en chaque point m du corps, à l'accélération avec laquelle s'accroît la quantité θ, qui représente la dilatation cubique du corps au point m. Quant à la densité μ de masse vectorielle, on peut dire qu'elle est égale, au facteur 4π près, à l'*accélération angulaire* de la rotation au point m, puisqu'on donne le nom de rotation au vecteur dont les composantes sont $\left(\frac{dv}{dz} - \frac{dw}{dy}\right), \ldots$ Si la théorie de l'élasticité n'était point

faite de manière à ne laisser place à aucune hypothèse, on pourrait imaginer : 1° que chaque élément de volume du corps, en se dilatant, exerce sur tous les autres des poussées directes proportionnelles à $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ et inversement proportionnelles au carré des distances ; 2° que la rotation $\left(\frac{dv}{dz}-\frac{dw}{dy},\ldots\right)$ de chaque molécule produit, par son accélération, sur chacune des autres une force inversement proportionnelle au carré des distances et dépendant en outre de l'obliquité, laquelle force tend à faire tourner ces autres molécules autour de l'axe de rotation de la molécule agissante. Ajoutons que la distribution des masses aurait lieu non seulement à l'intérieur du corps (champ E du § 2), mais encore à l'extérieur dans un espace que l'on peut supposer réduit à une couche mince à la surface du corps.

Remarquons encore que, si la vitesse angulaire de la rotation reste constante en chaque point, c'est-à-dire si :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dv}{dz}-\frac{dw}{dy}\right)=\text{const}\ldots$$

la densité μ de masse vectorielle est nulle, et par conséquent les forces qui s'exercent sur chaque molécule du corps sont identiques à celles que développerait un simple système de masses agissant à distance suivant la loi de la gravitation universelle.

6. *Sur la direction et la vitesse hypothétique du déplacement des masses électriques.* — Dans l'interprétation des propriétés du champ électro-magnétique, nous avons dit que la densité μ de masse vectorielle magnétique est identique à la densité i du courant. Or la densité du courant, dans la théorie ordinaire,

est définie comme étant le *flux* d'électricité qui traverse dans l'unité de temps l'unité de section du conducteur; la direction de ce flux en tout point est celle de la force électrique, parce que l'on suppose que les masses électriques sont entraînées dans la direction de cette force. Mais si ce déplacement hypothétique des masses électriques est dénué de sens physique, l'égalité : $\mu = i$ ne nous apprendra rien en réalité sur la nature physique de la masse vectorielle. Il y a donc lieu d'examiner tout d'abord si les masses électriques, dont la définition résulte de la formule (10):

$$4\pi\rho = \frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz}$$

peuvent être considérées comme se déplaçant dans une direction déterminée.

Imaginons pour un instant que ces masses aient une existence personnelle et que celles qui sont dans le champ à l'époque $(t + dt)$ soient les mêmes que celles qui y étaient à l'époque antérieure t et qui se seraient déplacées. Le chemin suivi par chacune d'elles dans l'intervalle de temps dt est absolument arbitraire, sous la seule condition qu'au temps $(t + dt)$ la nouvelle distribution électrique satisfasse encore à la formule (10) qui définit la nouvelle valeur de la densité ρ en chaque point. Donc, à moins de faire une hypothèse arbitraire, rien ne définit la direction ni la vitesse des déplacements supposés. Bien plus, la théorie montre qu'à l'intérieur d'un conducteur homogène parcouru par un courant permanent, la densité électrique ρ reste nulle. Si ce courant consistait en un flux de masses électriques, comme on le suppose ordinairement, quelle que fût la rapidité avec laquelle ces masses se transporteraient d'un bout à l'autre du conducteur, elles existe-

raient au moins pendant un certain temps à l'intérieur de celui-ci, et la densité ρ ne serait pas nulle.

Puisque la direction et la grandeur du flux d'électricité n'ont pas d'autre sens que celui qui résulte d'une hypothèse purement arbitraire, nous abandonnerons absolument cette notion de flux d'électricité et nous chercherons une autre interprétation du vecteur μ. Nous remarquerons d'abord que dans un élément de volume d'un conducteur où la densité du courant est i, il existe : 1° une force électrique f, qui est, comme nous l'avons dit au paragraphe 3, la caractéristique du champ électrique ; 2° une consommation W d'énergie électrique sous forme calorifique. D'après la loi de Joule, la consommation W d'énergie dans l'unité de volume est liée à f et à i par la formule :

$$W = ri^2 = fi,$$

r désignant la résistance spécifique du conducteur. On peut donc dire que la densité de masse vectorielle magnétique $\mu = i$ est définie en grandeur par la formule :

$$W = f\mu.$$

Quant à la direction du vecteur μ, elle coïncide avec celle de la force électrique f *dans le cas d'un courant permanent.*

L'intervention de l'énergie W, au lieu de celle du flux de masses électriques, dans la définition du vecteur μ présente un grand avantage au point de vue de la généralisation de la notion des masses vectorielles magnétiques dans le cas d'un champ variable ; mais nous ne nous étendrons pas sur ce sujet dans la présente note.

VASCHY.

EMPLOI DES ACCUMULATEURS

POUR

REMPLACER LES PILES DU POSTE CENTRAL DE PARIS

Les facilités d'emploi des accumulateurs, leur faible résistance intérieure, et la régularité de leur débit avaient depuis longtemps attiré l'attention des offices télégraphiques, car les batteries de piles nécessaires au fonctionnement des grands bureaux y occupent une place considérable et donnent lieu à d'importantes dépenses d'entretien.

A Paris, les premières études dans cet ordre d'idées remontent à 1886.

L'administration décida d'entreprendre une série d'essais comparatifs sur les meilleurs types existant à cette époque, et, d'après des pourparlers assez laborieux avec divers industriels pour le prêt ou la location d'une batterie de 50 éléments, un premier essai fut tenté, au commencement de 1889, avec un groupe d'éléments loués par MM. Philippart. 70 circuits, à voltages différents, étaient alimentés par cette batterie qui fonctionna régulièrement pendant plus de deux mois. Des résistances artificielles constituées par des lampes à incandescence avaient été interposées entre la batterie et les prises de courant des appareils de manière à limiter à 1 ampère l'intensité du courant dans le cas d'une mise à la terre accidentelle dans les appareils du poste central.

L'essai, malgré l'usure considérable constatée sur les plaques positives, avait été assez satisfaisant pour engager l'administration à continuer des recherches dans cette voie.

Au commencement de 1890, des pourparlers furent entamés avec la société pour le travail électrique des métaux pour l'essai et l'achat éventuel d'une batterie Laurent Cély. Construite spécialemeut pour cet objet, elle comportait 65 éléments de 1^{kg},500 de plaques qui furent mis en service, le 15 septembre 1890, et purent desservir jusqu'à 146 postes.

Les résultats furent tels, que M. le directeur-ingénieur Caël proposa l'achat d'une batterie de 5 kilogrammes de plaques dont l'entretien serait assuré par les fournisseurs pendant dix ans à raison de 10 p. 100 du prix d'achat.

Cette batterie, composée de 50 éléments d'une capacité de 60 ampères-heures, a fonctionné depuis d'une façon parfaitement régulière. Le débit total, mesuré sur le fil de terre, a varié, suivant les extensions du service, de 1 à 5 ampères. Elle est aujourd'hui employée à l'exclusion de toute pile positive pour assurer le service de nuit du poste central. On la recharge pendant le jour.

Jusqu'à ce moment, on n'était pas sorti de la période des études et des essais. La réinstallation de l'atelier d'électricité du poste central décidée, dans le courant de 1892, est venue faire faire à la question un pas décisif en obligeant l'administration à supprimer d'un seul coup près de la moitié des piles du poste central.

La réinstallation de l'atelier, qui fournit au poste central l'énergie électrique nécessaire à l'éclairage aux moteurs des appareils Hughes et Baudot et à

divers services accessoires, devait être effectuée sans qu'il en résultât aucune interruption dans le service. Il fallait donc pouvoir disposer les nouveaux appareils à côté des anciens, ce qui nécessitait la suppression au moins momentanée d'une des salles de piles contenant 3.000 éléments.

Cette suppression a pu être réalisée et est devenue définitive, grâce à l'installation d'une seconde batterie d'accumulateurs.

C'est le modèle Tudor qui a été choisi pour ce nouvel essai, comme se recommandant par sa grande solidité, par la sûreté de son fonctionnement et par les soins apportés au montage des éléments.

Les éléments sont au nombre de 60, pouvant fournir en service courant un potentiel maximum de 120 volts. Ils comportent chacun 15 kilogrammes de plaques pour une capacité de 72 ampères-heures. Le courant de charge est de 10 ampères au maximum; le courant de décharge varie suivant les nécessités du service entre 0,5 et 4 ampères.

La batterie est supportée par deux forts tréteaux parallèles qui contiennent chacun deux rangées superposées de 15 éléments chacune. Toutes les connexions des éléments entre eux, de même que les diverses prises de courant sont soudées. Les éléments sont isolés au moyen de godets en porcelaine remplis d'huile lourde (*fig.* 1).

L'entretien de la batterie est assuré par les fournisseurs moyennant une somme annuelle de 206 francs, représentant environ 10 p. 100 du prix d'achat; mais l'administration s'est engagée à n'employer pour le rechargement courant des éléments que de l'acide sulfurique parfaitement pur et de l'eau distillée.

On peut se rendre compte par cet exposé que les précautions les plus minutieuses ont été prises en vue d'assurer la constance et le bon fonctionnement de la batterie.

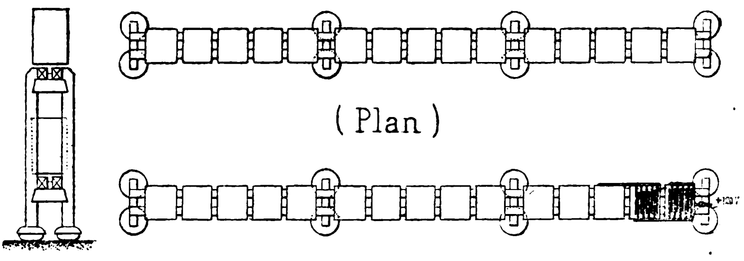


Fig. 1.

Une importante question restait à résoudre. Comment disposerait-on les prises de courant? A priori plusieurs solutions paraissaient admissibles. Le système qui consiste à prendre des dérivations à tous les potentiels nécessaires de l'inconvénient de faire travailler la base de la batterie beaucoup plus que le sommet. Le système qui consiste à relier toutes les lignes au potentiel le plus élevé de la batterie en intercalant des résistances a pour effet de supprimer ce qui constitue le principal avantage de l'accumulateur, à savoir sa très faible résistance intérieure. C'est donc le premier de ces deux systèmes qui a été choisi; mais, comme on le verra, des mesures ont été prises pour en atténuer les défauts.

Des précautions minutieuses étaient nécessaires pour prévenir les inconvénients résultant de courants trop intenses occasionnés par la mise à la terre accidentelle des prises de pile dans le poste. L'interposition d'une résistance unique sur une prise correspondant à plusieurs appareils supprimait, comme il a

été dit plus haut, l'avantage de la très faible résistance intérieure de l'accumulateur.

On a donc remplacé la résistance collective de chaque groupe par une série de résistances individuelles sur chaque appareil formées par un fil ténu qui fond, lorsque par l'effet d'une mise à la terre dans le poste, le courant dépasse 1 ampère. Ces résistances construites d'après les indications de M. Carême, inspecteur au Poste central de Paris (*fig.* 2), forment

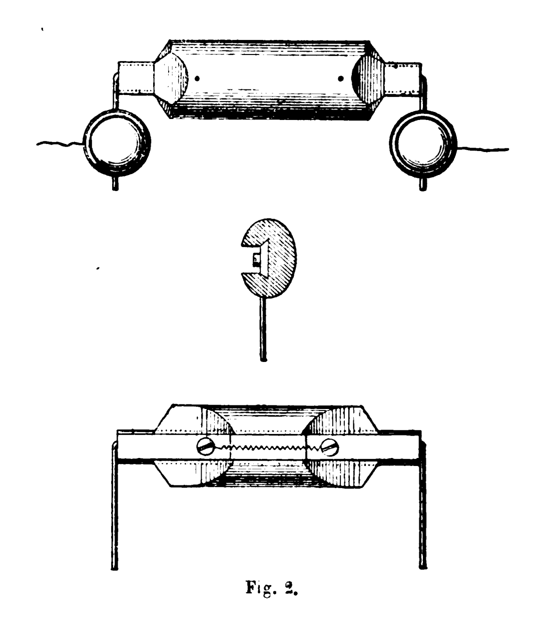
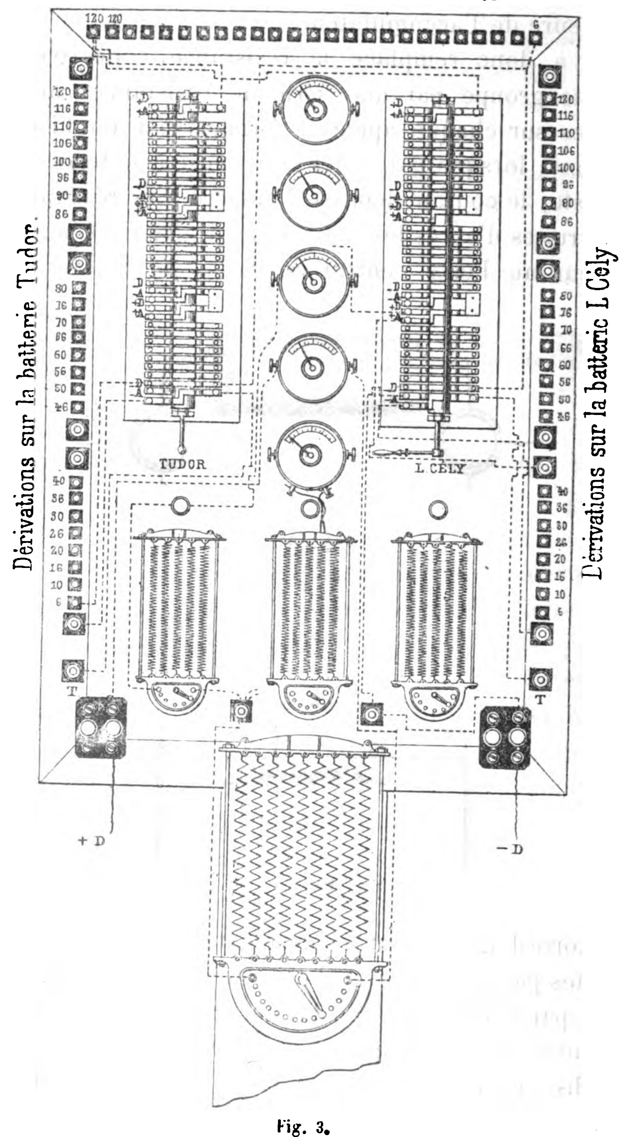


Fig. 2.

une sorte d'agrafe dont les deux extrémités métalliques réunies par une pièce en bois sont reliées métalliquement par le fil fin. En cas de court circuit, si le fil vient à fondre, un seul appareil se trouve momentanément inutilisé et rien n'est plus facile que de remplacer l'agrafe hors de service par une neuve.



Prises de courant du Poste central
Dérivations sur la batterie Tudor.
Dérivations sur la batterie L Cély
TUDOR
L. CÉLY
T
T
+ D
− D

Fig. 3.

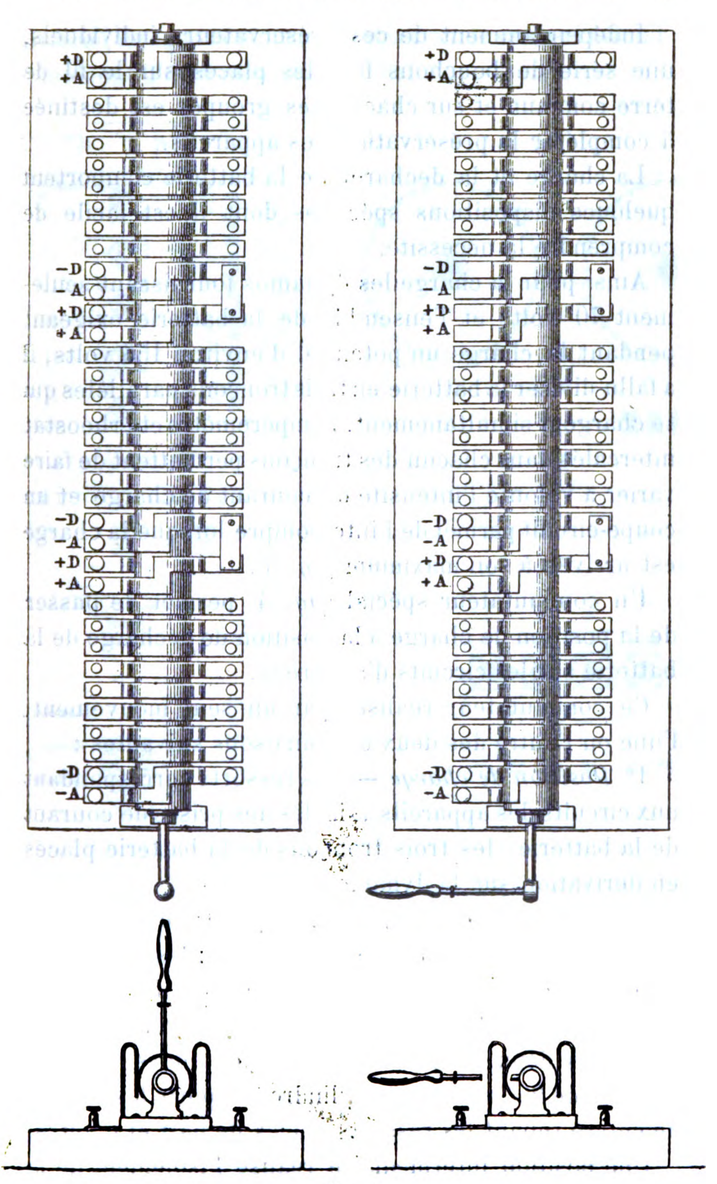


Fig. 4.

Indépendamment de ces préservateurs individuels, une série de bouchons fusibles placés sur le fil de terre commun et sur chacun des groupes est destinée à compléter la préservation des appareils.

La charge et la décharge de la batterie comportent quelques dispositions spéciales dont il est facile de comprendre la nécessité.

Ainsi pour la charge les dynamos fournissant seulement 70 volts et l'ensemble de la batterie exigeant pendant la charge un potentiel d'environ 156 volts, il a fallu diviser la batterie en trois tronçons parallèles qui se chargent simultanément. 1 ampèremètre et 1 rhéostat intercalés dans chacun des tronçons permettent de faire varier à volonté l'intensité du courant de charge et un coupe-circuit permet de l'interrompre lorsque la charge est arrivée à son maximum (*fig.* 3).

Un commutateur spécial (*fig.* 4) permet de passer de la position de charge à la position de décharge de la batterie sur les circuits d'appareils.

Ce commutateur réalise, par un seul mouvement, l'une ou l'autre des deux combinaisons suivantes :

1° *Position de charge.* — Les ressorts correspondant aux circuits des appareils... isolés des prises de courant de la batterie; les trois tronçons de la batterie placés en dérivation sur la dynamo.

2° *Position de décharge.* — Les prises de courant en connexion avec les circuits d'appareils; les trois tiers de la batterie reliés en série, le pôle négatif à la terre.

L'examen de la *fig.* 5 permet de comprendre comment ces deux combinaisons sont obtenues par une rotation de 90° environ du cylindre qui porte les bandes de cuivre reliant les ressorts placés de part et d'autre.

Une position intermédiaire réalise l'isolement de la

batterie, lorsque la charge étant terminée celle-ci attend le moment d'être mise en service.

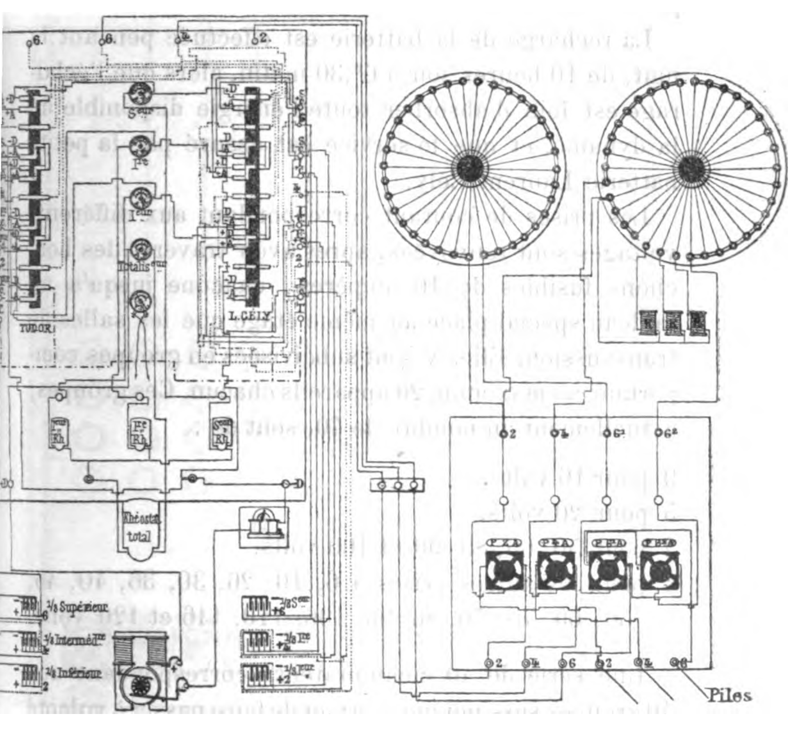


Fig. 5.

La batterie Tudor, de 60 éléments, assure aujourd'hui dans d'excellentes conditions le service de jour du poste central, qui comporte :

533 piles positives de lignes;

87 piles locales prises entre le 10ᵉ et le 25ᵉ volts et qui a elles seules absorbent plus de 3 ampères;

5 moteurs pour les distributeurs Baudot horizontaux alimentés par une dérivation spéciale prise entre le 90ᵉ et le 120ᵉ volts.

Cela représente, au total, un courant de 4 à 5 ampères en moyenne dans les éléments qui travaillent le plus.

La recharge de la batterie est effectuée pendant la nuit, de 10 heures soir à 6h,30 matin, alors que l'éclairage est loin d'absorber toute l'énergie disponible de la dynamo, et que le service est assuré par la petite batterie Laurent Cély.

Les prises de courant correspondant aux différents voltages sont renvoyées, après avoir traversé des bouchons fusibles de 10 ampères, chacune jusqu'à un tableau spécial placé au même étage que les salles de transmission. Elles y sont subdivisées en groupes comportant au maximum 20 appareils chacun. Ces groupes, actuellement au nombre de 40, sont de :

9 pour 16 volts.
5 pour 20 volts.
2 pour 50, 66, 80, 90 et 100 volts.
1 pour les autres prises à 6, 10, 26, 30, 36, 40, 46, 56, 60, 70, 76, 86, 96, 106, 110, 116 et 120 volts.

Une série de 40 commutateurs correspondant aux 40 groupes sus-indiqués permet de faire passer à volonté l'un quelconque des groupes des accumulateurs sur les piles de réserve ou réciproquement (*fig.* 6). La subdivision en groupes a pour but de restreindre, autant que possible, les conséquences des interruptions de service dues à une mise à terre fortuite de l'un des appareils du groupe. Un bouchon fusible de 4 ampères existe pour chaque groupe, et le tableau actuel comportera vraisemblablement dans un avenir prochain 40 annonciateurs fonctionnant sous une intensité de courant déterminée qui seront chargés d'avertir le personnel de

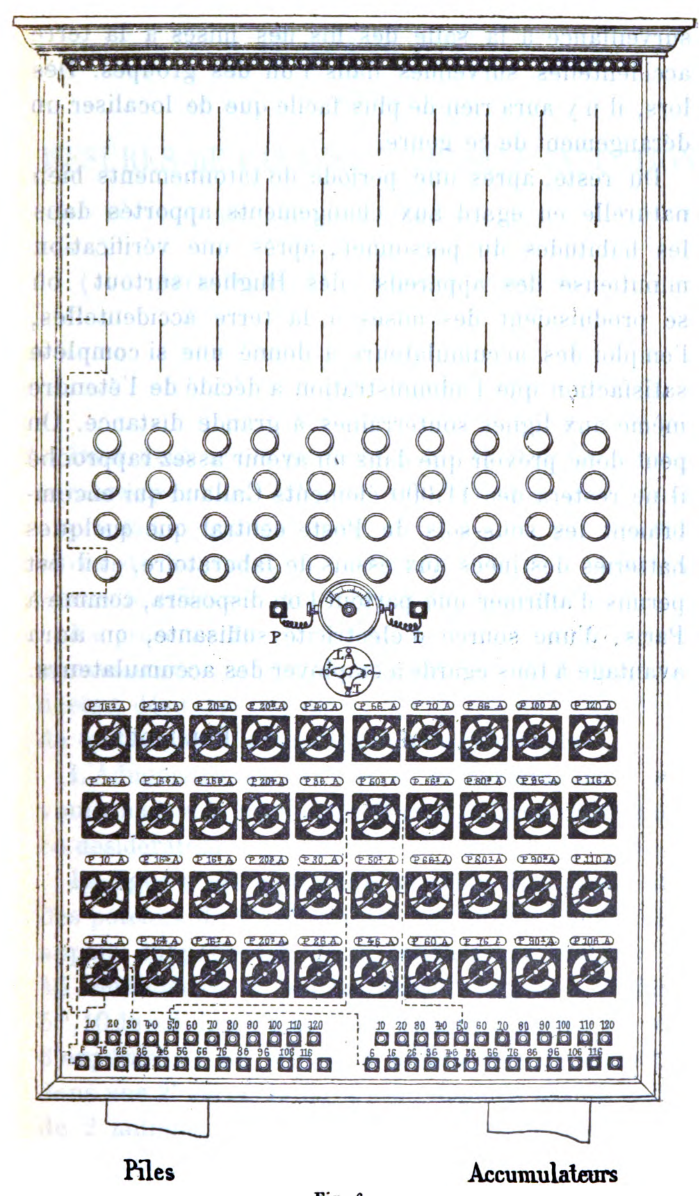


Fig. 6.

surveillance à la salle des fils des mises à la terre accidentelles survenues dans l'un des groupes. Dès lors, il n'y aura rien de plus facile que de localiser un dérangement de ce genre.

Du reste, après une période de tâtonnements bien naturelle eu égard aux changements apportés dans les habitudes du personnel, après une vérification minutieuse des appareils (des Hughes surtout) où se produisaient des mises à la terre accidentelles, l'emploi des accumulateurs a donné une si complète satisfaction que l'administration a décidé de l'étendre même aux lignes souterraines à grande distance. On peut donc prévoir que dans un avenir assez rapproché il ne restera des 11.000 éléments Callaud qui encombraient les sous-sols du Poste central que quelques batteries destinées aux essais de laboratoire, et il est permis d'affirmer que partout l'on disposera, comme à Paris, d'une source d'électricité suffisante, on aura avantage à tous égards à employer des accumulateurs.

V. Belugou.

TROISIÈME NOTE

SUR DES

MESURES DE CAPACITÉ, DE SELF-INDUCTION

ET D'INDUCTION MUTUELLE

EFFECTUÉES SUR LES LIGNES AÉRIENNES

Dans deux notes publiées dans les *Annales* de novembre-décembre 1890 et de juillet-août 1891, nous avons fait connaître les résultats donnés par des mesures de capacité, de self-induction et d'induction mutuelle effectuées sur des lignes aériennes.

La présence de fils voisins, en communication avec le réseau général, venait troubler les expériences, et il était désirable de pouvoir opérer sur un circuit isolé de toute ligne télégraphique ou téléphonique.

L'Administration des Postes et Télégraphes a bien voulu mettre à notre disposition une ligne répondant à ce desideratum.

La ligne a été construite au camp de Châlons avec des poteaux de $6^m,50$ plantés peu profondément. Les appuis supportaient deux conducteurs distants de 46 centimètres et placés respectivement à $5^m,50$ et $5^m,10$ du sol. Les conducteurs étaient dans une 1[re] série d'expériences en fer de 3 millimètres de diamètre; dans une 2[e] série, le fer a été remplacé par du cuivre de 2 millimètres. En outre, dans cette 2[e] série, nous avons disposé, sur une longueur de 10 kilomètres, d'un

troisième et d'un quatrième fils de cuivre posés sur consoles longues en face des premiers et écartés l'un de l'autre de 0m,87 (*fig.* 1). Les isolateurs employés étaient tous à double cloche.

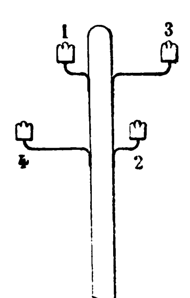


Fig. 1.

La ligne avait un développement de 33kil,8 et présentait à peu près la forme de la figure 2. La salle d'expériences était en A.

La ligne traversait en plusieurs endroits de petits bouquets de sapins au milieu desquels il avait fallu creuser un chenal pour donner passage aux fils ; mais pour la presque totalité du parcours elle était sur un terrain absolument découvert qui se séchait très rapidement en cas d'averse, et, en fait, pendant la 2e série d'expériences qui correspondait aux débuts de la période de sécheresse que nous avons traversée, nous avons rencontré des isolements atteignant plus de 8.000Ω kilométriques.

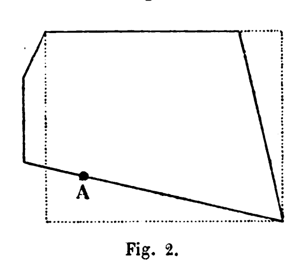


Fig. 2.

Les méthodes de mesures employées sont celles que nous avons indiquées dans nos deux premières notes.

Pour permettre de comparer les résultats de l'expérience avec les chiffres déduits des formules théoriques, nous croyons devoir indiquer ces dernières :

1° *Capacité d'un fil en présence du sol, et capacité d'un circuit métallique à double fil supposé soustrait à l'influence du sol.*

Les formules ont été données dans les *Annales* de 1881 et 1882 par M. Blavier :

$$(1) \qquad \frac{1}{C_1} = \frac{900}{0,2172} \log \frac{2h}{r},$$

h étant la hauteur du fil au-dessus du sol et r son rayon :

$$(2) \qquad \frac{1}{C_2} = \frac{900}{0,2172} \log \frac{\delta^2}{r^2},$$

δ étant la distance des deux fils et r leur rayon.

2° *Self-induction d'un circuit à double fil* (*fig.* 3).

M. Vaschy, dans son *Traité d'électricité et de magnétisme*, donne pour la self-induction kilométrique :

$$(3) \qquad L_k = 2\mathcal{L}\frac{\delta^2}{r^2} + \mu,$$

A

Fig. 3.

δ étant la distance des deux fils, r leur rayon, μ leur perméabilité magnétique. La self-induction de la ligne se déduit de l'expérience par la formule :

$$L = C_1 R_1^2 + \frac{1}{3} C R^2,$$

dans laquelle C_1 est la capacité d'un condensateur shunté par la résistance R_1, R et C la capacité et la résistance de la boucle (*).

3° *Induction mutuelle de deux circuits métalliques soustraits à l'influence du sol partant d'un point par une ligne et y revenant par une autre* (*fig.* 4).

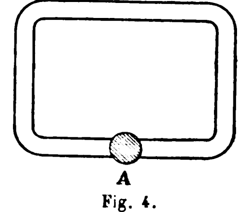


Fig. 4.

(*) *Annales* de 1890, p. 505.

Dans la formule interviennent et la longueur de la ligne et la forme de son tracé; il serait un peu compliqué de chercher la valeur de l'induction mutuelle pour le circuit même que nous avons expérimenté, mais M. Vaschy a bien voulu calculer, d'après la formule générale donnée dans son Traité, l'expression à laquelle on arrive dans le cas où la ligne figurerait un rectangle de longueur l et de hauteur h.

C'est :

$$(4)\qquad \frac{1}{4}\mathrm{M} = l\mathcal{L}\frac{2hl}{\delta(l+\sqrt{l^2+h^2})} + h\mathrm{M}\frac{2hl}{\delta(h+\sqrt{l^2+h^2})} + 2\sqrt{l^2+h^2} - 2(h+l),$$

δ représentant la longueur des deux fils.

La valeur de cette induction mutuelle se déduit de l'expérience par la relation :

$$\mathrm{M} = \mathrm{C}_1\mathrm{R}_1\mathrm{R}_2\ (^*).$$

4° *Self-induction d'un circuit métallique soustrait à l'influence du sol, partant d'un point par une ligne et y revenant par une autre* (*fig.* 5).

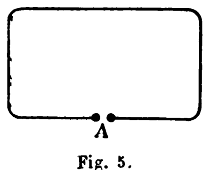


Fig. 5.

La formule est de même nature que la précédente, mais la perméabilité du métal intervient :

$$(5)\qquad \frac{1}{4}\mathrm{L}_1 = l\mathcal{L}\frac{2hl}{r(l+\sqrt{l^2+h^2})} + h\mathcal{L}\frac{2hl}{r(h+\sqrt{l^2+h^2})} + 2\sqrt{l^2+h^2} - 2(h+l) + \frac{1}{4}\mu(l+h),$$

r étant le rayon du fil et μ sa perméabilité magnétique.

(*) *Annales* de 1890, p. 504.

La méthode de mesure est la même que celle qui a été indiquée à propos de la boucle, mais c'est la relation $L_1 = C_1 R_1^2 + \frac{1}{12} CR^2$ qui intervient.

Comme observation, on peut remarquer que la valeur $L_1 - M$, tirée des formules (4) et (5), se présente sous une forme assez simple :

$$(6) \qquad L_1 - M = L(l+h)\left(\mathcal{B}\frac{\delta}{r} + \frac{1}{4}\mu\right).$$

Il resterait, pour terminer cette revue, à examiner le cas de circuits prenant terre à leurs deux extrémités, mais les mesures de la self-induction et de l'induction mutuelle n'ont pas été faites dans ce cas; pour la self-induction, parce que les méthodes que nous connaissons reposent sur l'équilibre stable du pont de Wheatstone ou du galvanomètre différentiel, et que cet équilibre est irréalisable en raison des courants telluriques; et pour l'induction mutuelle parce que la constitution du sol du camp de Châlons n'a pas permis d'obtenir quatre bonnes terres séparées.

On ne peut pas d'ailleurs déduire de la formule générale les valeurs de ces quantités qui varient avec la nature du sol au-dessus duquel sont placés les fils.

Ces préliminaires posés, examinons les résultats des mesures que nous avons effectuées.

Nous commencerons par les expériences sur les fils de cuivre, dont la perméabilité est connue et égale à 1 ; les nombres obtenus pourront ainsi être comparés avec ceux que l'on déduit des formules que nous venons de citer.

Pendant cette série de mesures, le temps était

exceptionnellement favorable, la pluie n'était pas tombée depuis vingt jours, l'atmosphère étant chaude et sèche et les courants telluriques relativement calmes.

	ISOLEMENT kilométrique	RÉSISTANCE TOTALE	CAPACITÉ KILOMÉTRIQUE par rapport à la terre	CAPACITÉ KILOMÉTRIQUE de la boucle supposée soustraite à l'influence du sol	SELF-INDUCTION kilométrique de la boucle	INDUCTION MUTUELLE des deux circuits	SELF-INDUCTION d'un circuit soustrait à l'influence du sol	
	Valeurs déduites de l'expérience.							
Fil supérieur.	8.000^{Ω}	194^{ω}	$0^{mf},0063$	$0^{mf},0046$	»	»	»	1er jour.
Fil inférieur.	9.000^{Ω}		$0^{mf},0064$					
Fil supérieur.	6.000^{Ω}	192^{ω}	$0^{mf},0066$	$0^{mf},0045$	$0^{q},00256$	$0^{q},056$	»	2e jour.
Fil inférieur.	7.000^{Ω}		$0^{mf},0068$					
Fil supérieur.	8.000^{Ω}	188^{ω}	$0^{mf},0065$	$0^{mf},0046$	$0^{q},00256$	$0^{q},053$	$0^{q},092$	3e jour.
Fil inférieur.	8.500^{Ω}		$0^{mf},0066$					
	Valeurs déduites du calcul.							
Fil supérieur.			$0^{mf},00597$	$0^{mf},00453$	$0^{q},00255$	$0^{q},059$	$0^{q},101$	
Fil inférieur.			$0^{mf},00602$					

Examinons ces résultats :

1° *Capacités.* — Nous avons la confirmation de ce que les précédents essais nous avaient fait soupçonner ; à mesure que l'isolement s'améliore, la capacité d'un conducteur, en supposant bien entendu que celui-ci ne soit en contact avec aucun corps autre que les isolateurs, diminue et se rapproche de la capacité théorique.

M. Brylinski (*) attribue aux isolateurs l'augmenta-

(*) *Annales* de 1892, p. 99.

tion de capacité constatée sur les fils ; la différence entre la capacité mesurée et la capacité calculée doit être pour la boucle, le quart de la somme des excédents des capacités, par rapport à la terre, mesurées et calculées.

Cette vérification n'est pas bien probante, puisqu'on trouve, au lieu de deux séries présentant les mêmes membres :

1,7 1
3,4 0
2,7 1

mais la concordance est assez nette dans une autre série d'expériences effectuées sur les troisième et quatrième fils qui présentaient une longueur de 10 kilomètres seulement, et qui étaient parcourus par des courants telluriques moins importants :

Capacités mesurées.	Fil supérieur. . .	0^{mf},0067	0^{mf},0043	1er jour.
	Fil inférieur . . .	0^{mf},0067		
	Fil supérieur. . .	0^{mf},0072	0^{mf},0045	2e jour.
	Fil inférieur . . .	0^{mf},0072		
Capacités calculées.	Fil supérieur. . .	0^{mf},00597	0^{mf},00388	
	Fil inférieur . . .	0^{mf},00602		

Les deux séries sont, en effet, les mêmes :

3,5 4
6,25 6

Toutefois, il convient de ne pas insister sur ces considérations, car la présence des courants telluriques trouble sérieusement la précision de ces mesures de

capacité, et les nombres donnés ne sont que des moyennes d'expériences répétées et successives.

2° *Self-induction kilométrique de la boucle.* — Nous avons trouvé constamment ce nombre de 0,00256 qui, on le sait, est la somme de deux quantités $C_1R_1^2 + \frac{1}{3} CR^2$. Le terme $C_1R_1^2$ variait légèrement d'une expérience à l'autre, mais le terme $\frac{CR^2}{3}$, fonction de l'état de la ligne, variait en sens inverse pour rétablir le même total. Cette mesure doit donc être considérée comme très précise; elle concorde absolument avec le nombre théorique 0,00255. Dans une précédente note (*), pour un circuit analogue, nous indiquions déjà le nombre de 0,0025, et nous le comparions à celui de $0^q,0028$, calculé par M. Vaschy. Nous faisions remarquer l'analogie des deux résultats; mais M. Vaschy avait fait le calcul pour deux fils de cuivre de 3 millimètres écartés de $1^m,50$. Le calcul exact donnait, au contraire, non pas un nombre analogue, mais un nombre identique à celui que l'on déduisait de l'expérience.

La question de la self-induction d'un circuit de cuivre bouclé peut donc être considérée comme complètement élucidée; cette self-induction se calculera au moyen de la formule (3).

3° *Induction mutuelle des deux circuits.* — Nous avons trouvé $0^q,056$ et $0^q,053$, soit en moyenne $0^q,0545$. Le calcul donne 0,0595, quantité absolument de même ordre, supérieure de 8 p. 100 au résultat déduit de l'expérience. Mais il ne faut pas oublier que cette quantité est fonction de la longueur de la ligne et que nous avons supposé celle-ci rectangulaire, alors qu'elle

(*) *Annales* de 1891, p. 343.

présente, au contraire, l'aspect d'un rectangle sensiblement déformé.

Nous avons essayé de mesurer, grâce à la présence de quatre fils de cuivre sur une longueur de 10 kilomètres, l'induction mutuelle d'un circuit en boucle sur un deuxième circuit en boucle (cas de deux lignes téléphoniques); mais cette action, qui n'est qu'une action différentielle, est peu importante, et la sensibilité de nos instruments ne nous a pas permis d'obtenir un résultat sur une ligne d'aussi faible longueur. Il aurait fallu disposer d'une ligne à quatre fils de plus de 100 kilomètres de longueur, pour pouvoir effectuer la mesure avec quelque précision.

4° *Self-induction d'un circuit soustrait à l'influence du sol.* — L'expérience donne $0^q,092$, le calcul $0^q,101$. Le calcul donne encore un nombre supérieur de 8 p. 100 à celui que fournit l'expérience. Nous avons fait remarquer l'analogie des formules (4) et (5); la même déformation a pu introduire la même erreur.

Passons maintenant aux résultats obtenus avec les circuits en fer.

	ISOLEMENT kilométrique	RÉSISTANCE TOTALE	CAPACITÉ KILOMÉTRIQUE par rapport à la terre	CAPACITÉ KILOMÉTRIQUE de la boucle supposée soustraite à l'influence du sol	SELF-INDUCTION kilométrique de la boucle	INDUCTION MUTUELLE des deux circuits	SELF-INDUCTION d'un circuit soustrait à l'influence du sol	
			Valeurs déduites de l'expérience.					
Fil supr. .	300Ω	594ω	0^{mf},0083	0^{mf},0064	0^{q},0160	0^{q},0354	0^{q},310	13 mars. Temps couvert grand vent.
Fil infr. .	1.000Ω		0^{mf},0083					
Fil supr. .	500Ω	586ω	0^{mf},0077	0^{mf},0057	0^{q},0157	mesure impossible	mesure impossible	14 mars. Un peu de pluie, l matin, vent violent. Courant telluriques très intenses e variables.
Fil infr. .	1.000Ω		0^{mf},0077					
Fil supr. .	»	»	0^{mf},0078	0^{mf},0055	0^{q},0162	0,04	mesure impossible	15 mars. Il a un peu plu le matin, mais la capacité a ét mesurée à 6h et le temps étai asséché. Orage magnétique.
Fil infr. .	»		0^{mf},0082					
Fil supr. .	1.300Ω	587ω	0^{mf},0072	0^{mf},0051	0^{q},0160	mesure impossible	mesure impossible	16 mars. Il a plu la nuit mais il y a du soleil et u vent desséchant. Orage magnétique.
Fil infr. .	2.500Ω		0^{mf},0073					
			Valeurs déduites du calcul.					
Fil supr. .	»	»	0^{mf},00624	0^{mf},00484	»	0^{q},059	»	
Fil infr. .	»		0^{mf},00629					

La valeur des self-inductions dépendant de la perméabilité du fer, nous ne pouvons plus ici compléter la deuxième partie du tableau.

1° *Capacités.* — La capacité de chaque fil par rapport au sol varie avec l'état d'isolement de la ligne se rapprochant de la capacité théorique à mesure que l'isolement s'améliore.

La comparaison du quart des excédents des capacités des deux fils, par rapport au sol sur les capacités théoriques avec l'excédent de la capacité mesurée de

la boucle sur la capacité calculée, donne les deux séries suivantes :

$$\left.\begin{matrix}10\\7\\8,5\\5\end{matrix}\right\} \text{ et } \left\{\begin{matrix}15\\8\\6\\2\end{matrix}\right.$$

Mais il convient de se rappeler que les courants telluriques étaient violents et variables (l'orage magnétique des 13, 14, 15 et 16 mars a été signalé par les observations météorologiques et l'enregistrement photographique de ces courants que nous effectuons au laboratoire de l'administration, a donné des courbes extrêmement mouvementées). La précision des mesures s'en est donc ressentie.

2° *Self-induction kilométrique de la boucle.* — Les différentes mesures sont concordantes, et le chiffre 0,0160 est certainement exact à $\frac{1}{100}$ près. La formule (3), dont nous avons vérifié l'exactitude pour des circuits de cuivre, permet dès lors de déduire la perméabilité du fer employé pour le courant de 12 milliampères avec lequel nous opérions. Cette perméabilité est de 137 à $\frac{1}{100}$ près.

3° *Induction mutuelle des deux circuits.* — Les valeurs calculées et mesurées sont bien de même ordre, mais il n'y a plus concordance. La formule d'ailleurs suppose que la ligne présente la forme d'un rectangle, ce qui n'est pas, et que l'isolement est parfait, alors que des isolements de 300$^{\Omega}$ kilométriques ne peuvent être considérés comme tels. Enfin, l'orage magnétique régnant rendait bien incertaine cette mesure délicate.

4° *Self-induction d'un circuit soustrait à l'influence*

du sol. — L'expérience donne $0^q,310$, le calcul $0^q,323$ en prenant pour la perméabilité du fer, le chiffre déduit de l'expérience sur la self-induction de la boucle. La concordance a lieu à 4 p. 100 près ; il n'y a eu, il est vrai, de mesures effectuées qu'un seul jour, mais c'était à un moment où les courants telluriques étaient relativement calmes.

On peut remarquer ici que l'approximation est plus grande qu'avec les fils de cuivre, ce qui s'explique facilement par ce fait que le terme en μ, lequel n'est pas influencé par la déformation du rectangle, est sans importance pour le cuivre dont la perméabilité est 1, et qu'il devient, au contraire, prépondérant pour un fer dont la perméabilité est de 137. On peut même aller plus loin dans cette voie de suppositions : admettons que l'écart de 8 p. 100 constaté sur le circuit de cuivre puisse être attribué uniquement à la déformation du rectangle de la ligne, cela revient à réduire, dans une certaine proportion, les trois premiers termes de la formule (5) qui seuls varient avec la forme de la ligne supposée de longueur constante. Faisons la même correction à ces mêmes termes dans la même formule appliquée au circuit de fer, le nombre calculé n'est plus 0,323, mais bien 0,313, et l'expérience et le calcul donnent des résultats concordants à plus de $\frac{1}{100}$. Nous ne voudrions pas attacher trop d'importance à ces rapprochements, mais ils sont curieux, et il nous a paru intéressant de les signaler.

Quelles sont donc les conclusions que l'on peut tirer de ces expériences?

Capacité. — La capacité réelle par rapport au sol est toujours supérieure à la capacité calculée ; elle

augmente quand l'isolement diminue et cette augmentation atteint 60 à 70 p. 100 pour des isolements kilométriques de 1Ω et tombe à 5 p. 100 pour des isolements de 8 à 9.000Ω.

Quant à la capacité d'une boucle supposée soustraite à l'action du sol, elle n'est pas, comme dans le cas de câbles, et ainsi que le disait récemment encore M. Preece, la moitié de la capacité de chaque fil par rapport au sol, mais elle est, comme l'indique la formule (2), fonction de l'écartement des deux conducteurs et d'autant moindre que cet écartement est plus grand; elle augmente aussi quand l'isolement de la ligne diminue. Deux fils de 3 millimètres, placés à 46 centimètres l'un de l'autre, ont pour capacité minima 0,00453; pour diminuer de moitié cette capacité, il serait nécessaire d'écarter les fils à $2^{m},10$.

La capacité est une quantité dont la mesure présente les plus grandes difficultés, et aucune méthode pratique directe ne permet de l'effectuer sur les lignes en service.

Self-induction. — La self-induction d'une boucle est, au contraire, une quantité dont la mesure est relativement facile.

Cette mesure ne présente d'ailleurs aucun intérêt pour les circuits de cuivre, puisque la formule (3) permet de calculer la self-induction en toute sécurité. Cette self-induction augmente lorsque l'écartement des fils augmente. On a donc un double intérêt à écarter, autant que possible, les deux fils qui constituent un circuit téléphonique lorsque celui-ci présente une grande longueur, puisque la self-induction favorable est augmentée, tandis que la capacité nuisible est diminuée.

Pour pouvoir calculer de même la self-induction des

circuits en fer, il suffirait, par une expérience préalable, de déterminer la perméabilité du fer employé; cette perméabilité a varié de 90 à 137 dans les échantillons que nous avons eu l'occasion d'expérimenter. Rien ne serait d'ailleurs plus aisé que de la déterminer pour les différentes fournitures au moyen d'une ligne d'essai de quelques kilomètres, sur laquelle on ferait une mesure de self-induction de boucle.

Pas de difficultés non plus pour la self-induction d'un fil unique soustrait à l'influence du sol.

La valeur de la perméabilité se tirerait de la relation :

$$(3\,bis) \qquad \mu = L - 2\mathcal{L}\frac{\rho^2}{r^2}.$$

Quant à la self-induction d'un fil en relation à la terre par ses deux extrémités, nous ne voyons pas le moyen de le mesurer, ainsi que nous l'avons expliqué au commencement de cet article.

M. Vaschy (*) indique que, dans un cas limite, lorsque les variations de courant sont extrêmement rapides et que le sol est suffisamment conducteur, tout se passe comme si le fil considéré se trouvait en présence d'un fil semblable qui occuperait la position de son image par rapport au sol. La self-induction est alors minima.

A cette limite inférieure, la self-induction est encore supérieure à la self-induction de deux fils bouclés, écartés de 50 centimètres, comme ils le sont généralement; il y a déjà une majoration de 50 p. 100 environ pour les fils de cuivre et de 10 p. 100 seulement pour les circuits de fer.

(*) *Traité d'électricité et de magnétisme*, t. II, p. 50.

Une limite inférieure de la self-induction des fils télégraphiques, c'est donc, après avoir mesuré la perméabilité du fil de fer, le seul renseignement que nous puissions avoir sur ce point pour les conducteurs télégraphiques.

Induction mutuelle. — La vérification faite sur les circuits de cuivre permet encore de considérer les formules comme exactes.

En résumé,

Nous connaissons les constantes électriques des circuits métalliques de fer et de cuivre tant qu'ils sont soustraits à l'influence de la terre, et nous possédons par conséquent la capacité, la self-induction, etc..., des circuits téléphoniques interurbains.

Mais nous sommes moins avancés pour la self-induction des fils télégraphiques ; nous savons simplement que, pour un fer de perméabilité donnée, la self-induction du fil est supérieure à un minimum qu'il est aisé de calculer, et qui dépend d'ailleurs de la hauteur du fil au-dessus du sol. Enfin, nous sommes fixés sur la capacité des fils et sur la variation de cette quantité avec l'état d'isolement de la ligne.

E. MASSIN.

TÉLÉPHONES ET TRAMWAYS ÉLECTRIQUES

On sait combien le voisinage des lignes électriques industrielles est dangereux pour les lignes téléphoniques, qui peuvent être troublées profondément par des courants d'induction intenses ou par des dérivations accidentelles encore plus à craindre. Ces accidents sont surtout à redouter avec les installations de tramways électriques qui se servent de la terre pour transmettre le courant de retour. Jusqu'à présent les administrations publiques n'ont pas hésité à protéger les lignes téléphoniques ; elles ont imposé aux compagnies industrielles l'obligation de se maintenir à une certaine distance des lignes des téléphones, et de prendre à leur charge toutes les dispositions nécessaires pour éviter les accidents.

En particulier, en Angleterre, la compagnie des téléphones a obtenu pendant ces quatre dernières années 50 bills du Parlement en sa faveur. Forte de ce résultat, cette compagnie vient de demander au Board of Trade que désormais chaque bill de concession renferme une clause protectrice dont la rédaction serait uniformément la suivante :

« La compagnie concessionnaire de traction électrique devra construire ses circuits électriques et ses ouvrages de toute nature, et devra aménager ses tramways, de façon à éviter toute influence nuisible par induction ou autrement soit sur les circuits électriques employés ou destinés à être employés par la compagnie des téléphones pour des communications téléphoniques, soit sur les courants qui les parcourent.

Pour les réseaux téléphoniques, aériens ou souterrains, établis après l'achèvement des travaux de la compagnie de traction, cette clause ne sera applicable que si toutes les précautions ont été dûment prises pour la construction de ces réseaux, et s'ils n'ont pas été placés inconsidéremment trop près des lignes ou ouvrages de la compagnie de traction.

Le Board of Trade après avoir entendu les représentants des deux compagnies n'a pas admis cette prétention, mais il a décidé de porter la question devant le Parlement et de faire nommer une commission chargée de rechercher si le pouvoir législatif, en concédant une ligne électrique, doit interdire l'usage de la terre pour le courant de retour, ou doit imposer l'obligation de remédier aux effets d'induction, aux dérivations accidentelles ou autres faits du même genre.

La question soumise à la décision de la commission est de la plus haute importance. Elle intéresse vivement toutes les administrations publiques qui auront certainement avant peu à se prononcer sur le même sujet, sujet fort délicat à cause de la valeur des arguments que chaque partie peut présenter en sa faveur.

La traction électrique à cause de la rapidité des communications qu'elle établira, à cause de son bon marché, est un problème dont la solution doit être facilitée et hâtée dans l'intérêt général. Elle rendra de grands services dans les villes étendues et dans beaucoup de cas pourra simplifier la question des chemins de fer métropolitains. Malheureusement jusqu'à ce jour, la seule disposition économique et pratique qu'on ait trouvée, consiste à prendre la terre comme conducteur de retour. Dans ces conditions aucune ligne téléphonique à simple fil ne peut exister *dans le voisinage ;* et

même, dans beaucoup de cas, il peut arriver que, par suite d'une configuration particulière du sol, il soit impossible, *dans une région déterminée*, d'éviter les dérivations à cause de la communication des différentes terres ensemble. Dans ce cas il faudrait doubler toutes les lignes du réseau téléphonique, et, pour effectuer cette transformation, refaire le réseau en entier.

Les défenseurs de la traction électrique n'hésitent pas à réclamer cette solution radicale ; ils affirment d'ailleurs que la ligne à simple fil est de beaucoup inférieure à la ligne double, et qu'il faut nécessairement choisir entre le maintien d'un téléphone défectueux ou l'établissement de la traction à bon marché.

Il est peut-être imprudent d'être aussi catégoriquement affirmatif. Il est loin d'être prouvé que les lignes à double fil soient si nettement supérieures aux lignes à simple fil. D'un autre côté, est-il sage de déclarer que la traction électrique a trouvé sa solution définitive et dernière, et ne doit-on pas attendre, avant de se prononcer, que de nouvelles expériences aient été faites, que la question ait été plus longuement étudiée ?

En fait les courants téléphoniques ne gênent en rien les courants industriels, le téléphone a pour lui le droit du premier occupant et ne peut pas être justement dépossédé et sacrifié au profit d'un nouveau venu qui n'a pas encore prouvé que ses efforts pour trouver une autre solution seront irrémédiablement stériles et impuissants. Aussi est-ce avec le plus grand intérêt que nous suivrons les phases du débat engagé, et nous attendons avec une légitime curiosité la décision que prendra la commission nommée par le Parlement anglais.

DEVAUX.

L'ALUMINIUM

SA FABRICATION ET SES DIFFÉRENTS EMPLOIS

AU POINT DE VUE DE L'ART DE L'INGÉNIEUR

Le *Journal de l'Institut de Franklin* a publié assez récemment un long article consacré aux différents usages industriels pour lesquels on peut utiliser l'aluminium. Cette publication tire un intérêt tout spécial du fait que son auteur, M. Alfred E. Hunt, est le président de la Pittsburgh Reduction Company, l'une des plus importantes sociétés américaines s'occupant de la fabrication de l'aluminium. C'est un résumé des considérations présentées par M. Hunt qui va être exposé ici.

A l'heure actuelle, dans le monde entier, l'aluminium ne se fabrique pour le commerce que par l'emploi d'électro-dépôts tirés d'électrolytes fondus. Les principales maisons qui produisent ce métal sont : aux États-Unis, la Pittsburgh Reduction Company et la Cowles Electric Smelting and Aluminium Company; dans la Grande-Bretagne, le Metal Reduction Syndicate, succursale de la Pittsburgh Company; en Suisse, l'Aluminium Industrie Action Gesellschaft, qui utilise l'eau des chutes du Rhin; en France, les usines de Froges et de Creil.

Depuis les méthodes indiquées par Wöhler, en 1827, et par Deville, en 1854, pour extraire l'aluminium de l'un de ses composés, beaucoup d'autres ont été expérimentées et préconisées; mais M. Hunt pense qu'il est impossible d'en trouver de plus économique que la

méthode électrolytique actuellement en usage, et il appuie cette assertion en fournissant un sous-détail du prix de fabrication. Cependant il est peut-être imprudent de nier la possibilité d'une découverte venant modifier ou renverser les procédés métallurgiques aujourd'hui en honneur dans l'industrie dont il s'agit.

Quoi qu'il en soit, tout ce qu'on peut affirmer, c'est que le traitement électrolytique fournit le métal très pur. La Pittsburgh Reduction Company obtient couramment des lingots renfermant 99,92 p. 100 d'aluminium avec 8/100 p. 100 de silicium, sans fer ni cuivre ni plomb.

La métallurgie de l'aluminium est donc arrivée à un degré de perfection aussi grande que celle de n'importe quel autre métal.

Aussi la question de l'aluminium consiste moins à chercher des modes nouveaux pour sa fabrication qu'à trouver des débouchés au métal en étendant son emploi dans tous les cas où il peut présenter des avantages.

Ce serait le véritable moyen d'arriver à un abaissement du prix commercial résultant de la diminution du coût de la fabrication, diminution qui sera due à l'augmentation de la capacité des fabriques.

Les problèmes les plus importants concernant l'aluminium se rattachent donc au développement des usages de ce métal dans les arts. Pour étudier la question avec fruit, il faut se garder également de deux opinions qui ont été très répandues à ce sujet dans ces dernières années. La première a soutenu que l'aluminium remplacerait, aussitôt qu'il pourrait être produit en quantité suffisante, tous les autres métaux, non seulement les métaux plus précieux utilisés dans

des cas spéciaux, mais encore le fer et l'acier dans le cas de construction des bâtiments et édifices. Par une réaction naturelle, la seconde voulait que l'aluminium fût presque inutilisable dans les arts.

Les partisans de ce second système ont, avec quelque mauvaise foi, tiré cette conclusion d'expériences peu décisives. C'est ainsi que l'un d'entre eux a fait des essais sur la solubilité de l'aluminium dans divers acides; il a pris une *feuille mince* d'aluminium et a trouvé que, dans l'espace de trois ou quatre jours, la feuille se dissolvait dans la proportion de 1 à 10 p. 100 dans des solutions d'acide acétique, butyrique, lactique, tartrique, citrique, oxalique, borique, etc. Il en a déduit que l'aluminium est impropre à la fabrication des ustensiles de cuisine et des récipients divers utilisés dans les laboratoires de chimie.

Cette assertion n'est pas fondée, parce qu'il existe des différences sensibles entre l'action des acides sur une feuille et sur une plaque plus épaisse. Tous les métaux actuellement employés dans les usages dont on vient de parler (fer, étain, cuivre) sont, sous faible épaisseur, solubles dans les acides. Avec l'épaisseur habituellement usitée pour les autres métaux, l'aluminium résiste mieux à l'action des réactifs.

L'eau salée n'attaque pas beaucoup plus l'aluminium que l'étain, le cuivre ou l'argent; les solutions de vinaigre auxquelles il est exposé, quand il est employé comme récipient ordinaire de cuisine, n'agissent pas sur lui. Les sels d'étain ou de cuivre, ainsi dissous, sont très vénéneux, tandis que les sels d'aluminium, qui se forment en moins grande quantité, se transforment par l'ébullition en un sous-acétate sans goût, sans odeur et sans action toxique.

Il est donc certain que rien n'empêchera d'employer l'aluminium à la fabrication des ustensiles de cuisine. M. Hunt prêche d'exemple, et, dans sa propre famille, ne se sert, depuis plus de deux ans, que de récipients en aluminium pour les usages domestiques ; aucun n'est le moins du monde, affirme-t-il, entamé par la corrosion.

Il faut donc chercher intelligemment un système intermédiaire entre les deux extrêmes, et, pour cela, on doit déterminer les usages pour lesquels les métaux peuvent être utilisés d'après une étude approfondie de leurs propriétés.

La principale impureté de l'aluminium commercialement pur, tel qu'on le fabrique aujourd'hui, est le silicium qui existe sous deux états, l'un en apparence combiné avec l'aluminium (ainsi que le carbone combiné existe dans la fonte), l'autre sous forme graphitoïdale en dissolution. Ces deux formes du silicium semblent exercer des effets quelque peu différents pour les propriétés du métal ; la forme combinée le rendant plus dur que la variété graphitoïdale ; le silicium combiné domine ordinairement puisqu'il constitue de 55 à 80 p. 100 du poids total. Le silicium graphitoïdal qui se dépose sous forme d'un résidu noir quand on dissout l'aluminium dans l'acide chlorhydrique ressemble à du graphite et a été considéré comme tel par beaucoup d'expérimentateurs ; cependant le carbone ne s'unit à l'aluminium que sous l'influence de très hautes températures ; il rend le métal cassant et sa présence se reconnaît à l'aspect de la cassure qui devient cristalline et colorée.

Une seconde impureté du métal marchand, c'est le fer ; le cuivre et le plomb peuvent toujours être évités

en choisissant convenablement le minerai et les appareils.

Pour de nombreux usages, l'aluminium le plus pur ne peut pas être employé aussi avantageusement que celui qui renferme 3 ou 4 p. 100 d'impuretés, attendu que le métal pur est mou. On ne doit donc chercher le métal pur que lorsqu'on le désire malléable, sonore ou peu susceptible de corrosion; mais dans la plupart des cas on ajoute avec succès une petite proportion d'éléments autres que le silicium et le fer, quand on veut obtenir la dureté, la rigidité et la force. C'est ainsi qu'on peut ajouter aisément et à bon marché du chrome, du cuivre, du titane; ce sont des éléments qui n'enlèveront rien à la non-corrosibilité du métal, comme le font les impuretés naturelles; ces additions donneront au produit plus de force, plus de dureté, en diminuant il est vrai sa malléabilité et sa ductilité.

Il est possible de faire varier ces éléments de telle sorte qu'on obtienne des fils d'aluminium présentant encore une résistance à la traction suffisante. C'est ce qui a été fait pour le cuivre allié au phosphore ou au silicium et ce qui a permis l'emploi de ce métal pour la construction des lignes électriques aériennes.

Les propriétés de l'aluminium qui lui donneront le plus grand prix dans les arts sont :

1° Sa légèreté relative;

2° L'avantage qu'il possède de ne pas se ternir à l'air même humide;

3° Sa grande malléabilité;

4° Le peu d'élévation de son point de fusion, ce qui permet de le travailler plus facilement;

5° Sa conductibilité électrique et calorifique.

Malheureusement, l'aluminium n'est pas un métal

très fort; sa résistance à la traction est à peu près égale à celle de la fonte de fer. Sous l'action d'une compression, le métal a une limite très restreinte au point de vue de l'élasticité; mais son extrême ductilité, qui lui permet de couler très facilement, le rend très propre à certains usages spéciaux où il y a compression.

Le fil d'aluminium présente une résistance à la traction plus considérable que celle du métal laminé. Ceci est dû à une propriété particulière de l'aluminium qui durcit quand on le travaille, propriété qui se développe encore lorsqu'il est allié à une petite quantité de cuivre, d'argent ou de titane.

Il est très facile de produire un fil d'aluminium allié à une faible proportion des métaux précédents. La conductibilité électrique d'un semblable fil est exprimée par le nombre 170, en appelant 100 celle du fil de cuivre de même poids; sa résistance à la traction est environ 2,66 fois plus grande que celle du fil de cuivre. Aussi peut-on penser que dans l'avenir un rôle important sera réservé à l'aluminium dans les constructions des lignes électriques. Pour obtenir des lignes présentant la même conductibilité que celles en cuivre usitées maintenant, le poids de métal serait notablement moindre, ce qui n'est pas à dédaigner au point de vue du prix et surtout au point de vue des charges que les réseaux sur toits imposent aux maisons. Le poids spécifique de l'aluminium varie de 2,56 à 2,70, d'où l'emploi tout indiqué de ce métal pour les pièces de machines, où la légèreté est un facteur de premier ordre et où l'usure dans les supports due à la mollesse du métal peut être évitée au moyen de viroles ou compensée par un réglage.

L'aluminium ne s'oxyde pas, du moins au point d'af-

fecter la solidité de sections minces du métal comme cela arrive pour le fer et l'acier; la faible couche de rouille qui s'étend à sa surface, lorsqu'il est exposé à une atmosphère humide, le protège contre toute action ultérieure.

Le fait que l'aluminium pur n'est pas sérieusement attaqué par l'eau bouillante ou par la vapeur, a provoqué l'idée de s'en servir comme garniture dans les machines à vapeur, en l'alliant avec d'autres métaux qui lui donnent la dureté nécessaire.

L'aluminium résiste à l'action des sécrétions organiques, même mieux que l'argent; aussi peut-on le substituer à ce dernier dans la plupart des usages chirurgicaux, tels que fils de suture, étuis pour instruments; il présente même l'avantage de pouvoir supporter sans détérioration les lavages par les solutions antiseptiques.

Dans un autre ordre d'idées, deux plaques l'une d'aluminium, l'autre de cuivre, de même épaisseur, ont été clouées sur les flancs d'un navire en bois qui a fait la traversée, aller et retour, de New-York aux Indes; ces plaques sont restées immergées dans la mer pendant quatre mois; elles n'ont pas été détériorées d'une façon appréciable par l'usage, mais l'épaisseur de la plaque de cuivre était devenue moindre que celle de la plaque d'aluminium. Cependant, on doit ajouter que l'emploi de l'aluminium pour le doublage des navires présente cet inconvénient que les mollusques s'y attachent plus facilement.

L'explorateur Monteil a fait construire récemment un bateau démontable en aluminium et présentant un très faible tirant d'eau. En ce moment, on va encore plus loin dans cette voie et on verra sous peu un bateau de haute mer dû à des usines françaises.

L'aluminium paraît être spécialement propre à remplacer la fonte, le fer et l'acier dans les constructions sous l'eau, où ces métaux sont généralement employés ; il est d'un usage facile dans les fondations en maçonnerie comme plaque de remplissage, car il se coupe moins aisément que le plomb.

Jusque dans ces derniers temps, le manque de méthodes pour souder convenablement l'aluminium était un très grand obstacle à son adoption pour de nombreux usages. Une double difficulté se présentait : d'une part, les substances servant à souder s'étendent mal sur l'aluminium ; d'autre part, par suite de sa grande conductibilité et de sa chaleur spécifique élevée, la chaleur de la soudure disparaît avec une rapidité telle qu'elles se refroidissent avant d'avoir coulé. L'emploi d'un fer à souder très chaud remédie au dernier inconvénient ; sur les points les plus difficiles, l'usage de cristaux de chlorure d'argent a facilité le coulage de la soudure (*).

On peut obtenir de la fonte d'aluminium dans des moules de sable secs ou dans des coquilles métalliques ; mais il faut une certaine habileté de la part du fondeur pour produire une fonte saine. L'aluminium ne doit pas être trop chauffé à partir du moment où il commence à fondre, autrement il absorbe des gaz qui restent dans le métal. En petites quantités, c'est dans des creusets en plombagine qu'il fond le mieux ; en grandes quantités, il est plus économique d'employer un fourneau à réverbère avec parois en briques d'alumine. Il n'est pas nécessaire d'avoir recours à un

(*) La soudure électrique et autogène convient admirablement. Il en est fait grand usage en France, notamment dans la fabrication des roues vélocipédiques.

fondant. La fonte d'aluminium éprouve par le refroidissement un rétrécissement assez considérable de 22 millimètres par mètre.

Il n'est pas douteux qu'un des plus grands usages de l'aluminium dans les arts aura lieu sous la forme d'alliages avec d'autres métaux. L'aluminium ajouté dans de faibles proportions à de très nombreux métaux possède des qualités remarquables.

Parmi ces alliages se trouve le bronze d'aluminium. Le bronze contenant de 8 à 12 p. 100 d'aluminium est un métal très dense, de grain très fin, et le plus fort des métaux connus tout en possédant une ductilité considérable. Il est tout indiqué pour la fabrication des cylindres destinés à résister à de hautes pressions. Le bronze renfermant de 5 à 8 p. 100 présente une résistance un peu moindre; mais il peut être laminé et martelé facilement, et travaillé comme l'acier; il a, sur ce dernier, l'avantage d'une plus grande ductilité et de pouvoir résister à la corrosion.

A l'exception du plomb, de l'antimoine et du mercure, l'aluminium s'allie aisément avec tous les métaux. Un grand nombre d'alliages utiles ont été découverts, et il est vraisemblable qu'il reste beaucoup à faire dans cette voie.

On peut répartir ces alliages en deux groupes, les uns renfermant l'aluminium avec 15 p. 100 au plus de métaux étrangers, les autres comprenant les métaux unis avec 15 p. 100 au plus d'aluminium; les premiers donnent de la dureté et de la rigidité et d'autres qualités utiles à l'aluminium; dans les seconds, c'est l'aluminium qui modifie avantageusement les propriétés des corps auxquels il est uni.

Ainsi, l'alliage d'aluminium avec une faible quantité

d'argent donne un métal plus blanc, plus fort, susceptible d'un beau poli et propre à la fabrication d'instruments délicats. Les alliages suivants ont été trouvés utiles : le nickel-aluminium (28 parties de nickel, 8 d'aluminium) employé dans les arts décoratifs; le sun-bronze (60 parties de cobalt, 10 d'aluminium); la rosine (40 de nickel, 10 d'argent, 30 d'aluminium, 20 d'étain) à l'usage des joailliers.

Comme métal à canon, des essais ont été faits avec un alliage de bronze d'aluminium et nickel. L'addition d'aluminium donne au laiton ordinaire une force supérieure et des qualités extraordinaires.

Le zinc aluminisé est plus coulant que le zinc ordinaire; il s'étend mieux et forme une couverture plus avantageuse pour le fer galvanisé.

Enfin l'aluminium a été employé avec succès pour remplacer la pierre lithographique.

On fait encore usage de l'aluminium pulvérisé mélangé avec du chlorate de potasse pour donner une lumière photographique brillante qui produit beaucoup moins de fumée que les composés du magnésium employés jusqu'ici.

Telles sont les principales applications de l'aluminium consacrées par l'expérience; depuis quelques années la demande d'aluminium a décuplé sur le marché. En présence des résultats acquis, il est permis d'espérer que l'emploi de ce métal recevra encore de nouvelles extensions qui, suivant la prédiction de M. Hunt, permettront d'abaisser son prix de vente et de l'utiliser pour certains usages où la question de dépense est le seul obstacle.

SONDAGES EFFECTUÉS DANS L'OCÉAN PACIFIQUE

PAR LA MARINE DES ÉTATS-UNIS

Le ministère de la marine des États-Unis vient de publier récemment le résultat des sondages effectués à la fin de l'année 1891 par les navires l'*Albatros* et la *Thétis*, entre la Californie et les îles Hawaï. La campagne entreprise par ces deux navires avait pour but de déterminer le tracé d'un câble sous-marin. L'intérêt de pareilles expéditions n'est pas limité au seul objet de permettre la pose d'un câble; il s'étend à la solution de problèmes encore obscurs de la physique du globe et de l'histoire naturelle. La connaissance exacte des profondeurs de la mer, de la nature du fond, des êtres organisés qui peuvent y vivre obligent les États à organiser des explorations dont les résultats sont aussi intéressants pour la science en général que pour la télégraphie. Les besoins ordinaires de la navigation n'auraient jamais obligé à entreprendre des études aussi difficiles, études au cours desquelles ont été réalisées des découvertes de la plus haute importance. C'est ainsi que dans des circonstances analogues, la *Seine*, bateau de la *Telegraph Construction and Maintenance C°* trouva, entre Lisbonne et Madère, par un fond de 2.400 mètres un banc à 100 brasses de profondeur; le *Faraday*, en 1879, découvrit un haut fond dans l'Atlantique; le *Dacia*, en 1883, a reconnu entre

Cadix et les îles Canaries, à côté de fonds de 2.000 mètres, un bas-fond de 58 brasses. On se rappelle aussi les croisières célèbres du *Ligthning* et du *Porcupine*, effectuées de 1868 à 1870 des îles Féroé au détroit de Gibraltar et dans la Méditerranée; du *Challenger*, qui parcourut plus de 60.000 milles dans l'Atlantique, de 1872 à 1876; du *Travailleur*, qui, en 1880 et 1881, fit sur les côtes du Portugal et de l'Espagne une campagne restée fameuse, et dont les riches collections provoquèrent à ce moment l'émerveillement du monde savant.

La difficulté de pareilles études est facile à comprendre. L'explorateur est séparé du lieu de ses recherches par une hauteur d'eau qui dépasse quelquefois 4.000 mètres, et il lui faut obtenir des renseignements précis sur la configuration du sol, sa composition chimique, sur la vie animale et végétale, les phénomènes volcaniques, les sources minérales, la température d'un terrain absolument inaccessible. Les instruments auxquels on a recours sont la sonde et le thermomètre.

Sondages. — Les sondages peuvent se faire à la main ou à l'aide de machines à sonder. Dans les bas-fonds on lance du navire un plomb en forme de tronc de cône, attaché à une corde de chanvre, qu'on a auparavant divisée en pieds ou en brasses. La corde en se déroulant passe à travers les mains d'un homme qui sent au toucher le moment où le plomb atteint le fond, et qui lit la profondeur en regardant la division qui correspond à la surface de l'eau. En remplissant de suif une petite cavité située à la base du plomb, on peut ramener une petite quantité du sable, du gravier ou des boues que le plomb a frappés, ce qui

donne une indication suffisante de la nature du fond.

La surface rugueuse d'une corde présente un obstacle à son libre passage à travers l'eau; quand la profondeur augmente, il faut employer des poids plus lourds pour atteindre le fond rapidement et suivant une ligne droite; il faut aussi une corde plus grosse pour supporter le poids du plomb. Dans les grands fonds, la grosseur de la corde présente à l'action des courants sous-marins une surface considérable, la direction s'éloigne de plus en plus de la verticale, et les résultats sont faussés. D'ailleurs, le poids de la sonde ne permet plus d'employer un homme pour la manœuvrer et d'estimer le moment où le plomb atteint le fond. Si on se sert d'une poulie, le poids de la partie immergée est suffisant pour la faire tourner, alors que le plomb a déjà touché le terrain solide, et la longueur de la corde qui a passé n'a plus aucun rapport avec la profondeur à mesurer. Pour éviter ces divers inconvénients, on se sert d'un fil métallique, de faible section qui résiste aux courants sous-marins et descend très rapidement.

Le fil employé est du fil de clavecin de $0^{mm},7$ de diamètre. Il pèse $65^{kg},60$ le mille, et sa charge de rupture est de 115 à 120 kilogrammes. Ce fil ne doit pas porter directement le plomb de sonde, car il se brise très rapidement s'il se forme une coque; aussi intercale-t-on entre l'extrémité du fil métallique et le plomb une cordelette de chanvre ou une chaînette de fer de 4 à 5 brasses. La machine ordinairement employée se compose essentiellement d'un tambour, sur lequel est enroulé le fil d'acier; sur le même axe que lui est calée une roue à gorge, dans laquelle passe une forte corde de chanvre, fixée à une extrémité en un

point fixe des bâtis, et tendue à l'autre à la main ou par des poids pour former frein. L'effort exercé sur ce frein doit augmenter au fur et à mesure du déroulement, pour faire équilibre au poids du fil déroulé. La machine employée par la marine des États-Unis comporte, en dehors de ces deux organes essentiels, une poulie fixée à un cadre vertical pouvant se mouvoir entre deux montants; cette poulie reçoit le fil qui se déroule du tambour; le cadre qui la porte est suspendu par deux cordes, qui, passant chacune sur deux galets situés à la partie supérieure des montants, viennent s'attacher à l'extrémité de deux ressorts spirales placés dans ces mêmes montants; un index fixé au cadre se meut devant une échelle divisée sur les montants verticaux, et permet de connaître à chaque instant la tension des ressorts ou celle du fil qui se déroule qui lui est égale. Au moment où le plomb atteint le fond, la tension du fil diminue et l'effort exercé par le frein suffit pour arrêter presque instantanément le tambour. Un compteur enregistre le nombre de tours de l'axe, et comme chaque tour correspond à une brasse, il est facile d'en déduire la profondeur.

Au moment où on relève le fil de sonde, l'effort exercé est quelquefois assez grand et les ressorts qui supportent la poulie seraient endommagés. Pour éviter cet accident, on place entre la partie inférieure du cadre de la poulie et le bâti de l'appareil un dynamomètre qui donne la tension du fil sans permettre de grands déplacements de la poulie. Le relèvement s'effectue d'ailleurs au moyen d'une machine à vapeur qui actionne le tambour par l'intermédiaire d'une courroie agissant sur une roue calée sur le même axe.

Cette machine imaginée par le commandant Sigsbee, de la marine américaine, ne paraît pas présenter de grands avantages sur celle qui était employée au bord de la *Dacia*. Cette dernière (*fig.* 1) avait un dispositif fort ingénieux pour augmenter la tension de la corde du frein, qui se trouvait réglée automatiquement de manière à faire équilibre au poids du fil déroulé. L'extrémité libre de la corde du frein pouvait être chargée à la manière ordinaire des poids nécessaires U; mais de plus elle était liée à l'extrémité d'une tige filetée V, à laquelle l'axe du tambour, au moyen d'une vis tangente B, communiquait en tournant un mouvement de rotation; sur la tige, un écrou chargé d'un contrepoids Z et guidé par deux rainures se déplaçait en s'approchant de l'extrémité de la tige et par là même exerçait un effort de plus en plus grand sur la corde C. On pouvait d'ailleurs rendre le mouvement tout à fait uniforme. Il suffisait de noter le chemin parcouru par l'écrou Z, dans un certain nombre de secondes, et de régulariser le mouvement en ajoutant ou retranchant des poids en U.

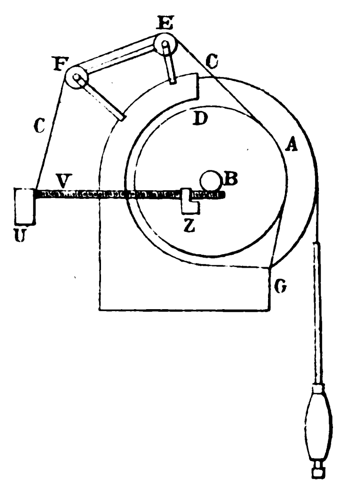


Fig. 1.

A mesure qu'on relève le fil, il faut soigneusement l'essuyer au moyen d'étoupes. Puis, la bobine tout entière est plongée dans une solution étendue de soude caustique ou de chaux dont on a eu soin de vérifier

l'alcalinité pour neutraliser l'acide carbonique qui est en dissolution. Quelquefois, et ce fut le cas à bord de l'*Albatros*, on remplaça la soude par l'huile qui ne ronge pas les soudures.

L'*Albatros* et la *Thétis* ont effectué leurs sondages suivant les arcs de grands cercles de la terre qui vont d'une part de Salinas (Californie) à Honolulu, et d'autre part de la pointe Concepcion à Hilo-Bay, et aussi suivant une ligne de vent de Salinas à Honolulu. Les sondages furent faits à des distances variant entre 10 et 2 milles; à chaque station on retira des spécimens de la nature du fond, et on mesura la température à la surface et au fond de la mer. A quatre ou cinq stations équidistantes sur chaque ligne de sondages, on observa des séries de température à la surface, aux profondeurs de 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1.000 brasses, et au fond. Les résultats, au point de vue du relief du sol, sont représentés sur une carte qui donne la courbe de niveau du fond de la mer entre la Californie et les îles Hawaï.

La profondeur moyenne est de 2.500 brasses. Nous remarquons par 128° de longitude O. de Greenwick et par 32° de latitude N. une pointe rocheuse à 976 brasses, et une autre à 413 brasses par 132° de longitude et 33° de latitude. Vers les îles Hawaï, la profondeur atteint 3.000 brasses. Les échantillons ramenés à la surface sont presque tous des débris coquilliers de globigérines, de diatomées et de ptéropodes.

Mesure des températures. — Le thermomètre employé fut celui de Negretti et Zambra, *fig.* 2. Le réservoir contenant le mercure est resserré en A. Cette partie est la plus délicate de l'appareil : c'est de sa forme que dépend le succès des observations. Au delà

vient une partie plus large B, puis la tige se redresse et se termine à la partie supérieure par un petit réservoir C. Dans la position ordinaire, le mercure remplit le réservoir, la tige et une partie du réceptacle C. Si l'on vient à renverser le thermomètre pour le placer dans la position indiquée sur la figure, la colonne mercurielle se brise en A, et le mercure remplit le réceptacle C et une partie de la tige. Une graduation qui part de C et va vers A permet de lire la hauteur de la colonne mercurielle, qui représente la température au moment du renversement. Si l'instrument reste dans cette position, la température indiquée au moment où on la lit est celle du point où s'est produit la rupture de la colonne mercurielle.

B A C

Fig 2.

On pourrait craindre que, dans le cas où la température s'élèverait, une certaine quantité de mercure ne tombât en C; le renflement B empêche cet inconvénient.

Ce thermomètre ne contient pas d'air, il diffère en cela de beaucoup de thermomètre de mer profonde qui, renfermant de l'air comprimé, offrent une certaine résistance à la pression extérieure. Aussi faut-il le placer dans une gaine de verre suffisamment résistante. Pour lui permettre néanmoins de suivre les variations de la température, la partie qui avoisine le réservoir est remplie de mercure qui y est maintenu par un diaphragme scellé à la gaine et au réservoir. Ce mercure transmet la température à l'intérieur de l'instrument. La gaine a toujours résisté aux pressions les plus élevées; elle se contracte bien un peu, mais la déformation n'est pas suffisante pour affecter le ré-

servoir. La graduation est gravée sur la tige même du thermomètre, et la gaine de verre assure sa conservation. Les vibrations et les chocs auxquels peut être exposé l'instrument, pendant qu'on le remonte à des vitesses quelquefois de 4 à 5 mètres par seconde, pourraient faire tomber un peu de mercure dans la tige. Pour éviter cet accident, la gaine de verre est placée dans un tube de laiton, et est appliquée contre les bases de ce tube au moyen de deux ressorts spirales, qui amortissent l'effet des mouvements brusques.

Voici maintenant le dispositif qui produit le renversement de l'appareil. Le tube de laiton *i*, *fig.* 3, est fixé à un montant *l*. A la partie inférieure, qui n'est pas représentée sur la figure, il peut pivoter autour d'un axe; il est maintenu à la partie supérieure par une goupille *o* qui pénètre dans une petite cavité creusée dans la base supérieure. Cette goupille traverse un cadre *e*, et est filetée à sa partie supérieure. Elle porte une petite hélice *n* qui, pendant la descente de l'appareil, vient buter contre un arrêt *p*. Au contraire, pendant le mouvement ascendant, cette hélice *n* se met à tourner; son axe se déplace vers le haut et se dégage de la cavité creusée dans la tête du tube *i*. A ce moment, l'appareil bascule sous l'effet de la résistance de l'eau et de son propre poids.

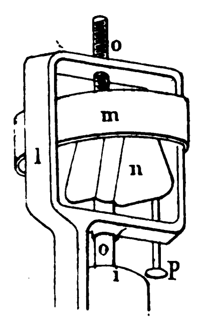


Fig. 3

Les températures observées au fond varient entre 35°,4 et 34°,8 Farenheit, c'est-à-dire entre 1°,9 et 1°,5 C. La variation de la température avec la profondeur est assez uniforme, comme le fait voir l'inspection des isothermes.

En résumé, il résulte de ces divers travaux d'exploration que la pose sera facile et qu'on pourra aisément éviter les montagnes sous-marines et les régions volcaniques qui peuvent avoir sur l'enveloppe du câble une action destructive et où des convulsions géologiques peuvent amener sa rupture. Les différentes substances qu'on a trouvées au fond se divisent en trois classes : les dépôts de la côte, les débris de ptéropodes, de globigérines et de diatomées, enfin les argiles rouges, grises et chocolat. Le fond qui paraît le plus avantageux est celui des débris coquilliers, car il ne se rencontre que dans les endroits où n'existe aucune substance capable d'endommager le câble ; les courants y sont rares et ne peuvent pas user l'armature en la frottant contre les rochers ; de plus, le câble est bientôt enfoui dans un lit qui le protège contre tous les accidents. On ne trouve pas de ptéropodes à plus de 1.500 brasses, et de globigérines à plus de 2.500 brasses, car l'action dissolvante de l'acide carbonique libre dans l'eau de mer à ces profondeurs, ne permet pas aux coquilles délicates de ces animaux d'aller plus avant.

Les points d'atterrissement ont été choisis en des endroits où la pente du rivage est très rapide, pour éviter d'exposer le câble à l'action destructive des détritus organiques qu'on rencontre sur les côtes. Auprès des îles Hawaï, la température de l'eau en hiver est de 20° environ. Il semble donc qu'il sera prudent de ne pas employer de gutta-percha pour le câble d'atterrissement. Il sera préférable de prendre le caoutchouc comme substance isolante.

GUTTAS-PERCHAS AMÉRICAINES

Suite (*)

Habitat. — Il est à remarquer que tous les arbres à gutta du globe sont compris entre les mêmes parallèles géographiques ; le premier, M. Séligmann, a noté ce fait remarquable, et j'y insiste ici pour compléter ses observations relativement à la situation géographique du ***Pindare***, du ***Masarandu***, du ***Marima*** et du ***Balata***, car on n'a, je crois, encore pas parlé des trois premiers ; le quatrième a été laissé dans l'ombre après l'insuccès de sa gomme dans l'industrie.

Je viens donc défendre ces espèces américaines que j'ai découvertes.

Courbes isoguttéiques. — M. Séligmann a déterminé l'aire géographique de la production des guttas ; je la circonscrirais volontiers entre deux lignes que j'appellerais *lignes isoguttéiques*, suivant à peu près le 6ᵉ degré de latitude nord et le 6ᵉ degré de latitude sud ; l'équateur terrestre partage donc cette aire guttifère en deux parties égales.

On n'a qu'à jeter les yeux sur une carte pour voir que les arbres à gutta, essentiellement équatoriaux, doivent habiter certains pays ; et en effet, on les y trouve à peu près constamment, et on ne les trouve pas ailleurs ; je dis « à peu près », car des circons-

(*) Voir *Annales télégraphiques*, mai-juin 1893, p. 257.

tances climatériques, géologiques, influences de hauteur, de sous-sol, d'inondation, de voisinage des mers peuvent faire que les arbres à gutta soient plus ou moins nombreux, et que parfois ils disparaissent dans toute une région.

Cependant, selon M. Séligmann, on serait « amené à considérer le cinquième parallèle comme une limite moyenne de l'habitat normal des plantes à gutta ».

M. Sérullas admet plutôt l'habitat des guttas entre les courbes isothermiques : « Il semblerait, dit-il, préférable d'être moins précis. Cependant, si au lieu de se servir de l'expression de parallèles géographiques on emploie celle de lignes isothermes, je ne vois plus aucun inconvénient à reprendre le mode de délimitation indiqué par M. Séligmann-Lui. En considérant en effet sur toute la sphère terrestre les deux courbes isothermes qui sont de chaque côté à 6° de l'intersection des équateurs géographique et thermique, à Célèbes, on constate que l'intervalle compris entre ces deux lignes renferme toute la Malaisie et toutes les terres où croissent les plantes à gutta-percha bonne ou mauvaise ».

Cette opinion de M. Sérullas m'est extrêmement précieuse ; on trouvera sur ces points, dit-il, *toute gutta bonne ou mauvaise ;* complétant sa manière de voir, en ajoutant qu'il n'y a plus de mauvaise gutta, grâce à la préparation, je crois pouvoir dire que la question de la gutta a fait un grand pas.

Cette aire géographique passe par le sud de la presqu'ile de Malacca, la côte orientale de Sumatra, les trois quarts méridionaux de Bornéo, entre l'Indoustan et Ceylan ; elle passe en Afrique entre Berbère et Obock ; la laisse au golfe de Guinée ; enfin pénètre

dans l'Amérique du Sud; elle y comprend les Guyanes, le Vénézuéla, s'enfléchit presque jusqu'au confluent du Rio-Negro avec l'Amazone, et suit la Colombie pour aboutir à l'Océan Pacifique.

Mais, comme je le disais plus haut, l'existence et la qualité des guttifères sont beaucoup modifiées suivant les conditions géologiques.

Conditions géologiques. — En général, sur le sol américain, les arbres à gutta aiment une humidité considérable, des bas-fonds gras et très ombreux, une grande régularité de température, l'abri des vents ; enfin un terrain perméable, à squelette granitique, comme le terrain silurien, facilement inondable au moindre orage.

On n'en trouve guère dans les montagnes ni dans les lieux appelés *moritchales*, où se déposent des alluvions nouvelles.

Balata, *Pindare*, *Masarandu*, *Marima*. *Leurs zones.* — Le *Balata* se contente de 1 mètre à 1^{m},50 de terre végétale, pourvu que le sous-sol soit une argile peu compacte, ou de l'argile mêlée à une grande quantité de sable, points toujours très humides où les radicelles trouvent facilement cette quantité d'eau qui leur semble si nécessaire.

Le *Balata* habite les Guyanes, suit toute la rive droite de l'Orénoque, qu'il remonte, et entre en Colombie par les forêts de l'Apure. A partir de l'Apure, il devient de plus en plus rare le long du Meta et dans la région des raudales d'Atures et de Maipures ; dans le haut Orénoque, la Vichiada, le Guaviare, l'Irinida, l'Atabapo, il n'est représenté que de loin en loin dans des points spéciaux, ainsi que dans le Cassiquiare.

Mais à partir de San Fernando de Atabapo, en

remontant l'Orénoque, puis passant dans le Rio Negro par le Cassiquiare, c'est-à-dire dans la région des *caoutchoucs*, si le *Balata* est presque absent, on trouve en quantité énorme le *Pindare*, le *Marima* et le *Masarandu* qui étaient très rares jusqu'au confluent du Guaviare.

Je crois être le premier à parler de ces arbres, donnant tous un lait excellent; il est donc utile d'en dire quelques mots.

Confusion due aux dialectes indiens. — Il m'a fallu un certain temps et beaucoup d'attention pour arriver à reconnaître d'abord, puis à classer ces arbres, à cause de la confusion qu'apportent les indigènes dans leur désignation. En effet, tout ce qui est arbre à lait et n'est pas pour eux exploitable, c'est-à-dire n'a pas une gomme vendable, n'attire pas leur attention; ces mots: *Masarandu*, *Marima*, *Pindare*, sont des noms indiens, ou des noms portugais ou espagnols défigurés quant à leur racine et signifient tous *arbre à lait* dans les différents dialectes.

Or, tous ces Indiens se sont groupés en peuplades distinctes, parfois sans relations les unes avec les autres, parlant des langues absolument différentes. Les Indiens d'un village vivent entre eux, se marient entre eux, ont des mœurs spéciales, surtout un langage à part. Par exemple, les Guahibos qui habitent à Vichiada sont absolument différents des Guahibos du Meta, et encore plus des Piaroas, dont le Sipapo est le point central. J'ai appris par cœur des mots piaroas ou guahibos désignant un même objet banal tels que la lumière, le soleil, la terre, l'eau, le feu, les parties du corps; il n'y a aucune analogie entre eux généralement.

Pour les arbres à lait, le *Marima* des Guahibos de Santa-Ritta est une euphorbiacée, le *Masaranda* de la région des raudales est une sorte d'anacardiée, voisine de l'acajou et appartenant à la famille des térébinthacées; ailleurs le *Marima* est le vrai *Mimops balata*. Le *Pindare* seul est généralement le même et appartient aux mimosées.

Enfin, dans l'isthme de Yavita, dans la forêt de ce nom comprise entre le grand village indien de Yavita et Pimitchin, existe une sapotée très nombreuse qu'un vieux yavitero m'a dit s'appeler *Conuco*, parce qu'on le trouve dans les points où les Indiens établissent leurs *conucos*, ou champs de culture; sapotée tellement voisine de l'Isonandra-percha, que d'après les descriptions que l'on donne de ces derniers arbres, je ne saurais les distinguer : le dessous de la feuille, qui est lancéolée, est duveté et mordoré; la feuille possède bien de quarante-quatre à soixante-quatre nervures secondaires, régulières et fines, et le latex se coagule presque spontanément, toutes indications qui, selon M. Sérullas, dénotent le vrai *Isonandra-percha* donnant une excellente gomme. La gomme que j'ai recueillie de ce *Conuco* est restée une excellente gutta, exempte de bactéries, sans aucune préparation spéciale.

L'*Isonandra-percha* véritable existerait donc sur le sol américain si mon observation est juste; il y a encore dans ces régions une foule d'arbres à lait, non classés, inconnus et appelés sûrement au plus grand avenir!

On voit la difficulté qu'on rencontre dans ces études par la confusion qu'apportent les Indiens dans la désignation des arbres. Ils ne connaissent bien que l'arbre à caoutchouc, l'*Hevœa*, qu'ils exploitent régulièrement,

et qui est une euphorbiacée facilement reconnaissable à première vue.

Et chose curieuse, inouïe, ils se servent de laits de gutta, d'excellente gutta, pour falsifier leur caoutchouc; le *Pindare* surtout est exploité par ruse dans ce but. Je ne reviendrai pas sur ce sujet que j'ai déjà traité dans mon travail sur le caoutchouc, au retour de ma première exploration.

La raison de cette sophistication réside, ai-je dit alors, dans ce fait que le *Pindare* est beaucoup plus riche en lait que l'*Hévée*, qu'on en recueille facilement 200 grammes en moins d'une demi-heure, alors que le lait de l'*Hévée* s'écoule lentement et goutte à goutte. En outre, les *Pindares* sont beaucoup plus rapprochés que les *Hévées*.

Le *Pindare* est une mimosée; je parle de l'arbre qu'on appelle généralement *Pindare*, ces désignations n'ayant, je le répète, rien d'absolu; le *Marima* est également une mimosée.

Seul le *Masaranda* — et ses variétés guttifères — est une sapotée.

Tous ces arbres, ainsi que le *Balata*, acquièrent sensiblement la même taille, qui est à peu de chose près celle de l'*Hévée*; grosseur, moyennement, du corps d'un homme, hauteur de 15 à 20 mètres; certains plus gros et plus hauts, certains plus petits et plus courts. Leur tronc, lisse et sans branches, s'élève d'un seul jet jusqu'aux premières branches, situées de 6 à 10 mètres du sol. Le *Balata* vrai est celui qui devient de beaucoup le plus gros et le plus élevé.

Pindare et Marima. — Les caractères généraux des *Pindare* et du *Marima* sont voisins; les feuilles sont alternes, généralement bipennées et munies de stipules;

les fleurs, en corymbes axillaires, sont hermaphrodites; elles ont un calice libre à cinq divisions, généralement, et une corolle à cinq pétales; les pétales, insérés sur le fond du calice, alternent avec les divisions de celui-ci; les étamines sont au nombre de huit, l'ovaire est simple et sessile, uniloculaire, surmonté d'un style très fin; enfin le fruit est celui des légumineuses, une gousse.

Certains *Marimas* et certains *Pindares* appartiennent aux sapotées.

Le derme du *Pindare* est rouge, celui du *Marima* brun, les feuilles de celui-ci sont plus grandes et plus charnues.

Les tiges jeunes des *Marimas* sont généralement armées d'aiguillons triangulaires qui tombent avec l'âge sans laisser de cicatrices.

Le lait du *Pindare* est le plus abondant : il est clair, s'écoule des incisions pratiquées sur le tronc avec assez de vitesse; chaque incision coule pendant près d'une heure; j'en ai fait jusqu'à trente au même arbre et j'ai obtenu ainsi en quelques quarts d'heure 3 ou 400 grammes de lait, jusqu'à 500 grammes. Cette quantité est très rare chez les arbres à lait; et nos procédés étaient loin d'épuiser le tronc; car des lignes circulaires profondes que je pratiquais à la naissance des branches pour empêcher la sève de se réfugier jusque dans les feuilles me permettaient de saigner l'arbre à fond du haut en bas, et d'obtenir ainsi jusqu'à 5 à 6 litres de lait en quelques heures.

Cette abondance explique pourquoi l'Indien use du lait de *Pindare* pour falsifier son caoutchouc.

Le *Marima* fournit à peu près autant de lait que l'Hévée, peut-être un peu plus. Ce lait est clair,

quoique visqueux et collant. Le lait du *Pindare* se coagule seul à l'ombre au bout d'environ trente-six heures à 30° de température; le lait du *Marima* met treize à quatorze heures à former le coagulum; l'eau d'hydratation, au lieu d'être claire, comme pour le *Pindare*, est blanche et semble un petit lait; reprise par une évaporation douce et par la potasse, elle donne un deuxième coagulum qui est une excellente gutta; mais cette opération demande une attention soutenue; si le feu est un peu vif, il se forme une résine noirâtre semblable à de la résine d'aloès; il semble qu'une grande partie de l'hydrogène ait filé et que le carbone seul reste à l'état de charbon; la préparation *se brûle* donc avec une grande facilité.

Je traite le lait de Marima comme tous les laits de gutta, par un procédé mécanique, une sorte de *barattage* qui m'est propre, réduisant ainsi beaucoup le rôle efficace de la chaleur, qui est un adjuvant précieux. La chaleur solaire de dix heures à trois heures de l'après-midi me suffit d'ordinaire.

Balatas. — Le *Balata* diffère peu, comme gros caractères microscopiques, de la description ci-dessus quant aux feuilles, aux fleurs et aux fruits. Il y a le *Balata rouge* et le *Balata blanc;* je ne m'occuperai que du premier, qui est le seul vraiment guttifère que je connaisse; j'en ai du reste rencontré peu de blancs dans les régions que j'ai parcourues. Je crois qu'une confusion s'est produite sur les *Balatas*, et qu'on appelle souvent ainsi un arbre plus petit, à écorce vert noirâtre, à bois blanc, à feuilles ovales dures et très épaisses, à fruit ayant l'aspect d'une olive; cet arbre serait une variété du Balata blanc; c'est lui qu'on emploie à Cayenne et dans les Antilles pour la construc-

tion sous le nom de *bois de natte* ou *sapotillé découpé*.

Bien que ce Balata ait un suc laiteux, il ne faut pas le confondre avec le Balata rouge, vrai arbre à gutta-percha, qui est une mimosée alors qu'il est, lui, une sapotée, ce mot unique de *Balata* pouvant produire une regrettable confusion. Le Balata sapotée produit également une gutta-percha qui paraît excellente ; son lait a l'avantage précieux de coaguler par l'acide sulfurique. Ce Balata ne me paraît pas d'origine américaine, car on ne le trouve qu'en certains points qui paraissent avoir été cultivés ; ce n'est guère que là où les Espagnols ont laissé des vestiges de leur passage que se trouve cette sorte.

Le Balata rouge, au contraire, le *Mimops balata*, celui sur lequel ont porté mes recherches, est un arbre essentiellement américain ; il abonde dans les Guyanes et au Vénézuéla ; sa taille, son nombre, la quantité de son lait, sa vigueur le mettent au premier rang parmi les bons guttifères de l'avenir.

Ses caractères sont ceux des mimosées en général ; ses fleurs, en grappes, d'un beau rouge, se développent et tombent rapidement : en moins de quinze jours elles viennent et disparaissent ; le fruit est une gousse agréable au goût. L'aubier est dur, presque blanc, excellent aussi pour la construction. L'écorce est grisâtre, assez foncée à l'épiderme ; le derme est d'un beau rouge, sillonné par les vaisseaux laticifères, d'où s'écoule un lait blanc, crémeux, très abondant.

Cet arbre peut être piqué à la manière des caoutchoucs, son lait se coagulant seul très lentement et ne fermant pas après quelques minutes les lèvres de la plaie par sa coagulation, comme cela arrive pour le *Masarandu*. Le piquage de l'arbre doit être comme

pour l'Hévée : dix à quatorze incisions obliques réparties en trois ou quatre lignes verticales; mais il faut, pour avoir un bon rendement, se servir d'échelles portatives permettant d'atteindre l'arbre sur une hauteur de 2^{m},50 à 3 mètres.

L'arbre bien piqué doit donner une moyenne de 150 à 200 grammes de lait tous les deux jours.

Je ne suis pas partisan d'abattre les arbres, opération longue et pleine de difficultés dans une forêt vierge pour avoir l'arbre étendu à terre. Je renvoie à tout ce que j'ai déjà dit à ce sujet dans mon travail sur le caoutchouc. Tout ce qui est applicable à l'*Hévée* comme moyen d'exploitation l'est aussi au Balata rouge.

Cependant, suivant l'âge, la grosseur et l'isolement de quelques sujets, il y a quelquefois avantage à les abattre. Le meilleur moyen d'en recueillir tout le lait est alors la décorticatiou complète. L'écorce, entièrement enlevée, est coupée à petits morceaux, mise à macérer pendant deux heures dans son poids d'eau alcalinisée à la potasse à une température de 30 à 35°, puis ces morceaux retirés du bain sont fortement exprimés sous une presse en bois produisant une forte pression ; le lait qui s'en écoule est d'excellente qualité; on le mélange à l'eau du bain passée dans un linge ; on fait évaporer pendant vingt-quatre heures à 40 ou 45°, puis on traite ce qui reste par ma baratte mécanique, en présence de l'acide phénique. On obtient ainsi une gomme de première qualité, nerveuse et solide, inaltérable, une gomme en un mot valant celle du meilleur Isonandra-percha.

Cette gutta est blanc rosé; la couleur est due aux glucosides de coloration, qui ne se décomposent pas par la suite, si l'antiseptic a été bien faite. Ces gluco-

sides sont ceux qui donnent au derme sa couleur rouge si franche; si la chaleur est trop vive dans le bain où ont été mis les petits morceaux d'écorce découpés, l'eau prend une couleur rouge brique que garde la gutta, qui alors n'est jamais bonne; ce temps de l'opération est donc délicat et exige une disposition spéciale.

Masarandu. — Le lait du *Masarandu* est des plus curieux à étudier.

Le *Masarandu* est un arbre d'ordinaire un peu plus fort que l'*Hévée*. Ses feuilles sont alternes, entières, coriaces, luisantes et très finement striées dans le sens transversal; le pétiole est assez court. Les fleurs axillaires sont hermaphrodites, disposées en ombelles simples; elles sont blanches, odorantes et très petites; le calice et la corolle ont généralement quatre divisions; les étamines sont au nombre de huit. L'ovaire, enfoui dans un duvet soyeux, couvert de poils très fins, est multiloculaire (six lobes), surmonté d'un style simple. Le fruit est une petite baie multiloculaire à graines rondes très dures; les singes et les perroquets en paraissent très friands, comme du reste des gousses du *Mimops balata*.

Le lait du *Masarandu* est extrêmement épais; exposé à l'air, il se prend très vite en un coagulum pâteux qui renferme 60 p. 100 de son poids d'eau. Ce coagulum met un temps assez long à perdre son excès d'eau. Traité par l'eau chaude vers 70°, puis comprimé, il le perd immédiatement et constitue une excellente gutta-percha, même sans aucun traitement chimique ou antiseptique.

Le *Masarandu* est un arbre assez commun dans le Haut-Orénoque, le Cassiquiare, le Ventuario, l'Ata-

bapo et le Rio-Negro ; mais la viscosité de son lait le rend assez difficile à récolter. Les vaisseaux laticifères siègent dans la couche la plus profonde du derme, presque contre le bois. Cette disposition, qui m'a frappé quand j'ai regardé l'écorce au microscope, m'a mis sur la voie dans la recherche de la méthode de recueillir le lait, qui constitue la meilleure des guttas des pays que j'ai parcourus. Je crois le *Masarandu* extrêmement voisin des meilleurs *Isonandras-perchas ;* mais n'ayant jamais vu ce dernier arbre, je ne puis que m'en rapporter aux descriptions que j'en ai lues.

Le meilleur moyen de recueillir le lait du *Masarandu* est de peler l'arbre entièrement ou partiellement. Le peler entièrement est le perdre ; mais on peut le peler aux deux tiers sans pour cela le faire mourir ; les vaisseaux nourriciers sont, en effet, verticaux, les plaies se ferment presque instantanément, peu à peu la peau se reforme par une véritable greffe, surtout si on a eu soin de laisser çà et là quelques ilots d'écorce.

J'ai ainsi traité quelques arbres en janvier 1889 dans le Rio-Negro ; je n'y suis pas retourné pendant ma dernière expédition ; mais au mois de juillet 1891 un de mes amis, qui s'occupe de l'exploitation du caoutchouc dans le Haut-Orénoque et que j'avais prié, entre autres choses, de voir comment ces arbres se comportaient, m'a affirmé qu'ils se portaient très bien et que l'écorce s'était entièrement reproduite dans les arbres que je n'avais fait peler que partiellement ; ceux qui avaient été complètement décortiqués étaient morts très vite.

Une fois l'écorce récoltée, il faut la laver dans l'eau chaude à 50°, avec une légère addition de potasse ou de soude ; on voit alors dans la partie interne une

pellicule blanche et gonflée; c'est là que sont les vaisseaux à lait; il faut la râcler partout soigneusement avec un couteau, puis l'exprimer très fortement; il s'en écoule un lait pâteux qui se prend presque aussitôt en une masse molle, et, reprise par la chaleur à 70°, elle forme une gutta parfaite, si on a soin de la laminer aussitôt avec un gros rouleau de bois.

Ces feuilles ont besoin d'être reprises, pétries et laminées plusieurs fois, afin d'en séparer complètement l'eau chargée de résine qu'elles contiennent encore. Un tour de main spécial est nécessaire pendant ces opérations.

Méthodes de préparation. — On voit par cet exposé qu'il n'y a pas une, mais qu'il devrait y avoir plusieurs méthodes de préparation, pour les laits de Balata, Pindare, Marima et Masarandu.

Il en est ainsi, en effet, si on veut traiter chacun de ces laits séparément; et pour chacun d'eux j'ai une méthode spéciale, qui est sensiblement la même pour les trois premières espèces.

Mais j'ai été amené à chercher si le mélange de ces différents laits ne donnerait pas un bon produit. Souvent, en effet, on va trouver un *Marima* à côté d'un *Pindare* ou d'un *Balata*, et il est avantageux de recueillir tout lait guttifère qui se présente. En outre, le mélange des laits permet d'établir dans un centre d'exploitation donné une seule méthode de préparation, ce qui est avantageux dans un pays où les Indiens seuls exploitent et sont souvent livrés à eux-mêmes : il leur faut des méthodes simples et uniformes.

Inertie des coagulants chimiques. — J'ai cru d'abord que les agents chimiques avides d'eau, tels que l'acide

sulfurique, l'alcool, qui m'avaient donné de si excellents résultats pour la préparation du caoutchouc, allaient produire également une coagulation spontanée des laits guttifères : le mécanisme devait être le même, obtenir une déshydratation rapide. Mais l'expérience est venue rapidement me convaincre qu'il fallait renoncer à toute spéculation de ce genre; la plupart de ces laits isolés et tous ces laits mélangés ensemble *ne coagulent pas par les procédés chimiques à l'instar du caoutchouc.*

Pourquoi en est-il ainsi? Je ne saurais le dire; il faut se contenter ici d'enregistrer un fait.

De même, la chaleur ne me donnait que des résultats pitoyables; presque toujours je brûlais mes préparations.

Utilité d'une coagulation mécanique. — Je songeai donc à une séparation mécanique des globules du liquide naturel de l'eau, dans lequel ils sont suspendus, ou, plutôt émulsionnés. J'avais fait quelques essais de ce genre pendant ma première expédition et j'avais bien vu que là seulement était la vérité; la gutta que j'avais ainsi obtenue était restée parfaite.

Dans le cours de ma seconde expédition, ayant eu à ma disposition une grande quantité d'arbres à lait (Balatas surtout), dans la partie de la Guyane vénézuélienne que je parcourais, j'ai pu compléter mes expériences et arriver à une solution pratique.

Ma méthode. — Ma méthode se compose :

1° De la coagulation;

2° De la désinfection et de l'antiseptisation; ces deux résultats s'obtiennent simultanément et par une seule opération.

La coagulation rapide est obtenue sitôt les laits

cueillis et mélangés entre eux dans des proportions fixes, en présence de l'acide phénique; elle est obtenue grâce à un barattage spécial dû à une turbine à volant et à effet centrifuge; un arrosage continuel de la paroi de la turbine avec l'acide phénique du commerce (non cristallisé) étendu d'eau assure l'antiseptie.

Le lait a été préalablement chauffé à 40 degrés. L'opération de la coagulation et de la désinfection doit être faite en plein soleil, de 10 heures à 3 heures.

Un litre d'acide phénique impur est suffisant pour 20 litres; c'est-à-dire pour environ 12 à 13 kilogrammes de gutta. On voit que la dépense pécuniaire en acide est à peu près négligeable. La chose essentielle est que le lait barbote dans l'acide phénique pendant tout le temps de l'opération.

Quant à la turbine, elle coagule 10 litres de lait en moins d'une heure; un homme est occupé à tourner le volant, un autre à recueillir les feuilles de gutta tous les quarts d'heure.

J'ai essayé d'employer le sublimé corrosif en place d'acide phénique; une solution alcoolique à 1/10 protège suffisamment un kilogramme de gutta. Celle-ci est superbe et conserve indéfiniment sa belle couleur blanche un peu rosée du début, mais il est à craindre que la présence du bichlorure de mercure ne rende une gutta ainsi faite impropre aux manipulations industrielles ultérieures.

J'obtiens la gutta eu feuilles de 60 centimètres de haut, de $1^{m},50$ de long sur environ 2 millimètres d'épaisseur collées sur une bande de tissu dont il faut les séparer.

Ces feuilles sont reprises plusieurs fois à l'eau chaude et pétries; puis séchées à l'ombre.

Je publierai exactement, plus tard, la façon dont j'opère la disposition de ma turbine, et le coup de main spécial nécessaire à une bonne fabrication. Ayant en effet divulgué dans tous ses détails, il y a trois ans, ma méthode de fabrication de caoutchouc, on l'a publiée dans les journaux sans mon autorisation, ce qui m'a causé de grands préjudices. J'ai cette fois l'intention de prendre un brevet d'invention pour ma préparation des guttas, après quoi je ferai un travail plus complet sur la matière.

La gutta est indispensable. — C'est avec raison, en effet, que les ingénieurs et les électriciens qui s'occupent spécialement de télégraphie sous-marine se sont émus de la rareté de plus en plus grande des bonnes guttas.

Rien, en effet, ne peut à cette heure remplacer la gutta-percha dans cette industrie de premier ordre ; en vain a-t-on essayé l'ozokérite, l'asphalte et divers goudrons, la kérite, la composition Brooks, l'isolant Berthoud-Borel, la deuxième composition Brooks, ou son diélectrique, le caoutchouc lui-même, on a dû forcément revenir à la gutta : aucune composition ne saurait lui être substituée, et encore faut-il que la gutta soit d'excellente qualité, que son inaltérabilité soit à peu près absolue, sinon le câble est rapidement hors de service.

Or, la pose d'un câble sous-marin est une opération coûteuse et difficile; elle exige des bateaux à vapeur qui, chargés d'un câble déjà à moitié posé ne peuvent lutter aisément avec la grosse mer, et parfois se perdent, comme cela s'est vu plusieurs fois ; en outre les cahiers des charges des compagnies concessionnaires sont léonins; la pose d'un câble est donc une grosse

affaire, nécessitant des capitaux de plusieurs millions. Aussi, s'en tient-on de part et d'autre à la gutta, dont le pouvoir isolant et l'inaltérabilité ont fait leurs preuves pendant de longues années; et on est peu disposé à essayer des produits nouveaux, dont l'échec serait un désastre financier.

Certes, il n'est pas impossible qu'on remplace un jour la gutta par un produit d'égale valeur, mais ce produit n'est pas encore né et force est de s'en tenir jusque-là à la gutta-percha.

Malheureusement, en même temps que la consommation augmente démesurément, la production diminue d'une façon effrayante.

Quand on jette les yeux sur les statistiques, — et il est inutile que je les énumère ici — on est frappé de voir l'écart constant entre l'importation et les demandes qu'on fait de gutta. Des ingénieurs électriciens distingués m'ont dit qu'il fallait prévoir et envisager le moment où l'on n'aurait plus de guttas, où, par conséquent, les relations télégraphiques interocéaniques seraient impossibles : le prix de la gutta augmente à ce point que si la progression continue il faudra la payer au poids de l'or.

Cela tient à ce que la consommation augmente sans cesse : les indigènes devant l'importance des ventes qu'ils pouvaient faire, ont abattu des arbres à l'infini dans des contrées où ils étaient déjà peu abondants, ces contrées elles-mêmes ont été défrichées, et à la suite de ces vandalismes, les bons Isonandras deviennent introuvables.

Il n'en est pas de même des arbres américains. Là, dans une contrée immense, plus grande que l'Europe, renfermant les Guyanes, le Vénézuéla, la Colombie,

une partie du Brésil, il y a une telle profusion d'arbres à lait qu'il faudrait des générations de plusieurs millions d'hommes pour venir à bout, par l'abatage, de cette colossale armée de *Pindares*, de *Balatas*, de *Masarandus*, *Marimas*. Et l'on voit la quantité de gutta-percha que l'on produirait quand j'aurai dit qu'un Balata abattu donne jusqu'à 25 et 30 litres de lait!

Là donc était le problème à résoudre : tâcher de rendre bonne cette gutta-percha inépuisable que renferment les forêts américaines.

Tel a été constamment le but de mes recherches. Je crois, — que l'on veuille bien me pardonner cette bonne opinion de mes propres travaux, — être arrivé bien près de la réussite. S'il en était ainsi, l'avenir de la télégraphie sous-marine pourrait être envisagé sans trop d'appréhension par MM. les ingénieurs électriciens. Il s'agirait alors d'attaquer résolument les arbres américains et d'en préparer le suc suivant les procédés que j'indique dans cette étude.

Dr LUCIEN MORISSE.

CHRONIQUE

Grandes résistances électriques.

Pour obtenir de grandes résistances non-inductives, le professeur Fleming se sert d'un procédé très simple qu'il est intéressant de faire connaître. Il mélange de la plombagine avec de l'argile, en proportions variables selon la résistance à obtenir ; il forme avec cette pâte des cylindres qu'il fait ensuite cuire dans un four à poteries.

Un mélange à parties égales de graphite et d'argile présente une résistance spécifique 4.000 fois plus considérable que le maillechort. N'oublions pas, toutefois, que ces résistances varient avec la température dans une mesure assez notable.

(*Bulletin international de l'électricité.*)

Expériences sur l'isolement des fils recouverts de soie ou de coton.

M. Luquer publie dans l'*Électrical Engineer* les résultats d'expériences qu'il a faites sur l'isolement des fils recouverts. Une première série de recherches a été entreprise dans le but de déterminer les qualités respectives de la soie et du coton, quand les fils recouverts de ces substances sont placés dans une atmosphère humide. Les résultats trouvés sont les suivants :

La soie est supérieure comme isolant au coton, et cela parce qu'elle résiste mieux à l'influence de l'humidité, étant moins hygrométrique. La double couverture de coton est aussi bonne que la soie, dans l'air sec, pour les voltages inférieures à 120 volts. A l'air humide son isolement tombe plus vite et plus bas que celui de la soie, mais reste supérieur à celui du coton

simple. Le coton simple, même très sec, est de beaucoup inférieur. La soie à l'air humide conserve une résistance suffisante pendant une demi-heure, alors que l'isolement du coton est devenu absolument mauvais.

On arrive aux mêmes conclusions en étudiant les mêmes substances enduites de gomme-laque, de sorte que finalement on aboutit aux conclusions suivantes :

La soie enduite de gomme-laque est le meilleur isolant. La soie seule vient immédiatement après, même avec la faible épaisseur de 0,012 millimètres. Le coton double, enduit de gomme-laque, est presque aussi bon que la soie seule, mais sous une épaisseur plus que double. Le coton double seul doit être placé après. Vient ensuite le coton simple enduit de gomme-laque. Le coton simple seul est le moins bon puisqu'il présente une épaisseur supérieure à celle de la soie. Il est donc prudent quand on emploie le coton de l'enduire de gomme-laque et de le maintenir toujours au sec.

Sur les capacités de polarisation.

Par M. Bouty.

Après avoir rappelé les beaux travaux de M. Blondlot sur les capacités de polarisation et les lois expérimentales découvertes par ce savant, M. Bouty expose à la Société les recherches qu'il a entreprises sur le même sujet par des méthodes différentes. Ses recherches ont porté principalement sur les électrolytes fondus, les électrolytes dissous aux dilutions extrêmes et les électrolytes solides. Elles ont pleinement confirmé les lois de M. Blondlot, en particulier celle de l'indépendance de la capacité initiale de polarisation par rapport à la direction du courant polarisant.

Les méthodes employées par M. Bouty font usage d'une résistance métallique R toujours considérable, et au moins de l'ordre de grandeur de la résistance r de l'auge (qui peut elle-même atteindre jusqu'à un méghom). La capacité initiale de polarisation a été déduite d'expériences portant soit sur la période de charge ou sur la période de décharge de l'auge

électrolytique. Nous ne nous occuperons ici que des premières qui sont les plus complètes et les plus importantes.

Soit E la force électromotrice de la pile de charge. Au bout de quelques millièmes de seconde la période variable relative soit à la self-induction, soit à la capacité électrostatique du circuit, peut être considérée comme terminée. Soit $I_0 = \frac{E}{R+r}$ l'intensité que possède alors le courant, la différence de potentiel des électrodes est $\varepsilon_0 = r I_0$, et peut être considérée comme une valeur initiale au point de vue de la polarisation qui est très lente à s'établir. On mesurera les différences de potentiel $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_n$ à des époques t correspondant à un nombre entier d'oscillations d'un pendule interrupteur, à partir du commencement des observations. Un calcul facile permet d'en déduire les polarisations totales p de l'auge aux mêmes époques.

Les polarisations p sont fidèlement représentées par la formule empirique

$$p = \frac{1}{C} \frac{I_0 t}{1 + Bt}.$$

Le coefficient C est, par définition, la capacité initiale de l'auge. Le coefficient B est caractéristique de la dépolarisation spontanée. Ces coefficients sont, dans les limites des expériences, complètement indépendants de la situation respective des électrodes, ainsi que de l'intensité I_0 et de la direction du courant.

Pour séparer les effets des deux électrodes et mesurer leurs capacités individuelles C_1, C_2, M. Bouty a opéré de deux manières :

La première consiste à faire varier arbitrairement les surfaces S_1 et S_2 des électrodes. On a, d'après les propriétés des condensateurs,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2};$$

d'autre part l'expérience donne

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{K} \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right),$$

avec une valeur constante de K. K est la capacité initiale de

l'une quelconque des deux électrodes rapportée à l'unité de surface ; sa valeur est indépendante du sens de la polarisation, ainsi que M. Blondlot l'avait annoncé.

La seconde méthode, plus directe, mais d'un emploi plus délicat, consiste à faire usage d'une électrode parasite isolée que l'on associe successivement aux deux électrodes principales pour mesurer leur polarisation individuelle. Les deux méthodes fournissent des résultats identiques. Ajoutons que les capacités calculées par la méthode de décharge coïncident, au degré de précision des expériences, avec celles qui sont fournies par la méthode de charge.

Voici maintenant les résultats particuliers aux diverses catégories d'électrolytes.

Électrolytes fondus. — Quand une électrode de platine a séjourné pendant 24 heures dans un électrolyte fondu, elle possède une capacité initiale invariable à température constante et croissant rapidement avec la température en même temps que la polarisation maximum décroît. Pour l'azotate de soude entre 300° et 400°, M. Bouty a trouvé

$$K = 26 + 0,005\,(t - 300)^2.$$

K est exprimé en microfarads par centimètre carré. Le coefficient B, caractéristique de la dépolarisation spontanée, croît aussi suivant une fonction parabolique de la température.

La valeur de K pour l'azotate de soude fondu à 300° diffère peu de celle qui convient aux dissolutions concentrées d'azotate de soude à la température ordinaire.

Électrolytes liquides de grande résistance spécifique. — Pour le platine et les dissolutions concentrées de la plupart des sels (sels de platine exceptés), les valeurs de K sont voisines les unes des autres et varient peu avec la dilution. Pour des électrodes de platine ayant séjourné dans le liquide, elles peuvent varier, suivant l'état de la surface du platine, de 20 à 30 microfarads par centimètre carré.

Pour l'eau distillée M. Bouty trouve en moyenne K = 10 microfarads, pour l'alcool absolu $K = 5^{mf},5$; mais pour des mélanges plus résistants d'alcool absolu et de benzine (de 1 à 5 de benzine pour 1 d'alcool), on trouve K = 8 : il n'y a donc aucune relation entre la variation de K et la valeur de la résis-

tance spécifique : les capacités de polarisation demeurent très grandes dans de véritables diélectriques.

Électrolytes solides. — Quand un électrolyte fondu se solidifie, la capacité K décroît brusquement ; elle paraît ensuite tendre vers zéro quand la température s'abaisse de plus en plus, c'est-à-dire à mesure que la résistance spécifique devient de plus en plus considérable. Il y a là une différence caractéristique entre les électrolytes liquides et solides. M. Bouty la rapproche de la différence précédemment constatée par lui, au point de vue de la polarisation maximum, qui, dans les électrolytes liquides très résistants, demeure toujours de l'ordre de 1 à 3 volts au plus, tandis que dans les électrolytes solides elle peut atteindre une valeur plus grande que toute quantité donnée.

Télégraphie et téléphonie simultanée.

D'après l' « Elektrotechniker Anzeiger », M. Jules Demetzky, de Budapest, a construit il y a quelque temps déjà un appareil permettant d'employer pour la correspondance téléphonique un fil télégraphique pendant la transmission d'un télégramme. Cette invention aurait été récemment complétée et amenée à un tel point de perfection qu'on a pu, avec l'autorisation du ministère hongrois des communications, faire des expériences d'assez longue durée sur un fil télégraphique d'un développement de 200 kilomètres qui relie Budapest à Szegedin. Ces essais auraient eu un succès complet. L'appareil très simple peut être introduit avec une grande facilité sur tout conducteur télégraphique et être immédiatement employé pour le service téléphonique. La transmission télégraphique simultanée par le même fil ne gêne aucunement les conversations par téléphone au moyen de cet appareil, qui a en outre l'avantage de supprimer toute influence de l'induction et de faire disparaître tous les bruits étrangers qui troublent les communications téléphoniques. Lorsqu'il est employé à de courtes distances, comme dans les résaux locaux, l'appareil agit avec tant de force que la conversation peut être entendue très

distinctement, sans téléphone récepteur, par plusieurs personnes placées dans la chambre.

(*Journal télégraphique.*)

Le réseau téléphonique de Vienne.

A la suite des critiques formulées par la presse en ce qui concerne le service téléphonique à Vienne, le directeur de ce réseau s'est adressé à M. J. Hopkinson pour faire examiner toute l'installation et étudier le fonctionnement général du service. M. Hopkinson vient de publier son rapport ; en voici les parties essentielles :

Sur les lignes téléphoniques de Vienne, la transmission est nette et claire, plus nette que sur les réseaux de Londres, de Paris et de Berlin.

Les lignes sont suffisamment exemptes de bruits autres que ceux résultant des conversations. Toutefois on entend, quelquefois, des transmissions télégraphiques et des appels sur d'autres lignes. « Il m'est même arrivé une fois, dit M. Hopkinson, d'entendre une conversation sur une ligne voisine ; mais sous ce rapport Vienne est dans de bien meilleures conditions que Londres ou Berlin, mais moins que Paris, où les lignes ne sont presque jamais troublées par des bruits extérieurs. »

En ce qui concerne la rapidité des mises en communication des abonnés, Vienne est incontestablement le meilleur réseau téléphonique important que je connaisse. Dans les cas que j'ai observés, il suffit de 25 à 75 secondes pour établir une communication d'abonné à abonné. A Berlin, la durée est de 1 1/2 à 2 minutes ; à Paris, de 3 à 4 minutes et même quelquefois plus. Enfin, à Londres, la plus courte durée que j'ai observée était d'une minute, mais il m'est aussi arrivé d'attendre 3 à 5 minutes.

Cet avantage de la rapidité dans le service des communications est dû en grande partie à ce fait qu'il n'existe à Vienne qu'un seul bureau central avec trois commutateurs multiples, tandis que dans les autres capitales il y a un grand nombre de bureaux reliés par des lignes auxiliaires.

Les lignes viennoises sont en partie aériennes avec retour par la terre ; de là quelques troubles. Mais les câbles se tiennent très bien, et sur 70.000 fils, on n'en a jamais eu à réparer que 20. Je ne vois donc pas la nécessité de les remplacer.

Les commutateurs multiples permettent de relier entre eux 8.000 abonnés. Leurs organes sont beaucoup plus robustes que ceux de la Western Electric Company, connue comme la meilleure fabrique de commutateurs.

Les abonnés viennois payent 210 francs par an quand ils se trouvent à moins de deux kilomètres du bureau central. A Londres, ils payent 500 francs, à Paris, 400 francs..., et à Berlin, dans un rayon d'un kilomètre du bureau central, 188 francs. Si l'on considère que l'État autrichien prélève une taxe de 25 francs par abonné et par an, on voit que le prix d'abonnement au téléphone à Vienne est relativement modéré.

(*Bull. Intern. des Électriciens.*)

BIBLIOGRAPHIE

Introduction à l'électricité industrielle, par P. Minel. (Gauthier-Villars, éditeur.)

M. Minel, ingénieur des constructions navales, vient de faire paraître, dans la collection de l'*Encyclopédie scientifique des aide-mémoire* publiée sous la direction de M. Léauté, deux fascicules intitulés : *Introduction à l'électricité industrielle.*

Dans cet ouvrage, consacré principalement à la théorie des phénomènes électriques et magnétiques, l'auteur s'est proposé d'exposer les principes nécessaires à l'étude des applications industrielles de l'électricité. Les matières traitées sont : l'Électrostatique — lois du courant électrique — étude des piles — actions réciproques des courants et des aimants — théorie de la machine Gramme — travaux récents sur les circuits magnétiques dans les dynamos. Enfin un dernier chapitre, particulièrement intéressant, donne des vues d'ensemble et traite notamment du rôle des milieux diélectriques, du mode de

propagation des ondes électro-magnétiques (expériences de Hertz, etc.) et du lien qui rattache les phénomènes électriques aux phénomènes lumineux.

En résumé M. Minel a présenté, sous une forme relativement concise et sans développements mathématiques, tous les résultats importants d'une théorie aujourd'hui classique. Nous signalerons quelques vues personnelles de l'auteur dans les chapitres relatifs à l'énergie et au potentiel.

La Télégraphie duplex théorique et pratique, par J. Pégot. — E. Bernard, éditeur.

Dans ce petit volume de 150 pages, M. Pégot expose, d'une façon très claire et très simple, les principes sur lesquels reposent les divers systèmes de transmission simultanée dans deux sens et donne une description détaillée de ceux de ces systèmes qui ont été ou sont encore appliqués en France.

Ce livre n'a d'autre prétention que celle de permettre au personnel studieux de l'administration des postes et télégraphes d'y trouver des indications complètes sur une question généralement assez peu connue.

Comme l'auteur a soin de le dire dans sa préface, c'est le recueil de ses notes, communiquées d'abord à plusieurs de ses collègues et qu'il s'est décidé à publier en voyant le vif intérêt avec lequel elles avaient été accueillies.

Les méthodes différentielles, les méthodes basées sur les principes du pont de Wheatstone, l'application de ces diverses méthodes aux lignes sous-marines, sont passées sucessivement en revue dans les trois parties de cet ouvrage.

Les phénomènes électriques qui accompagnent les transmissions sur les lignes aériennes ou sous-marines y sont exposés avec beaucoup de netteté et avec assez de détails pour qu'il ne reste aucune hésitation dans l'esprit du lecteur, et des descriptions très claires lui permettent de se rendre un compte bien exact de l'installation de l'appareil Morse et de l'appareil Hughes en duplex par les différentes méthodes, et

de celle des appareils à miroir et recorder par les systèmes Ailhaud et Muirhead.

En résumé, c'est un livre utile, que les agents feront bien de lire pour leur instruction et qui les intéressera assez pour que cette étude leur devienne un plaisir.

Nécrologie.

M. Gidel, Inspecteur-Ingénieur des télégraphes à Grenoble, vient de s'éteindre après une longue et cruelle maladie. Ancien élève de l'École polytechnique, il était entré dans l'Administration des Postes et des Télégraphes en 1879. Sorti de l'École supérieure en 1881, au moment de la construction du réseau télégraphique souterrain, il participa pendant plusieurs années à cet important travail et apporta toujours sur les différents chantiers qui lui furent confiés, une initiative et un esprit d'observation qui le faisaient particulièrement apprécier.

Il fut versé, en 1885, dans le service ordinaire et il eut à diriger le service technique du département du Rhône, puis de celui de l'Isère. Il ne put malheureusement donner dans ces différents postes tout ce que promettaient ses brillantes qualités, par suite de la maladie qu'avait développée chez lui depuis trois ans, le surmenage intellectuel auquel il s'était livré et qui devait l'enlever à l'âge de trente-cinq ans.

Il sera sincèrement regretté par tous ceux qui l'avaient approché et avaient pu apprécier, en même temps que l'amabilité de son caractère, les dons de son intelligence vive et pénétrante.

H. T.

L'Éd.-Gérant, Dunod. — Paris. — Imp. C. Marpon et E. Flammarion, rue Racine, 26.

ANNALES

TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1893 Septembre - Octobre

CALCUL DES FORCES AUXQUELLES SONT SOUMIS LES CORPS PLACÉS DANS UN CHAMP ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE

1. Pour calculer les actions réciproques de corps électrisés, aimantés ou parcourus par des courants, on applique ordinairement les lois fondamentales de Coulomb, de Laplace et d'Ampère, en supposant connues en tous les points de ces corps la répartition des masses électriques ou magnétiques et la distribution du courant. Mais l'application des lois en question n'est légitime que dans le cas de l'équilibre électrique ou du régime permanent du courant. En outre, elle peut donner lieu à des erreurs importantes lorsque le diélectrique interposé entre les divers corps n'est pas homogène.

Nous nous proposons de montrer, dans cette note,

comment on peut calculer, aussi bien dans l'état variable que dans le régime permanent, les forces mécaniques auxquelles est soumise une parcelle quelconque d'un corps, homogène ou non, diélectrique ou conducteur, sous l'action d'un champ électro-magnétique. A cet effet, nous commencerons par écarter les idées suivant lesquelles ces forces seraient exercées instantanément à toute distance soit par des masses électriques ou magnétiques, soit par des courants. Outre les inconvénients déjà reprochés, dans de précédentes notes, à la théorie des *actions à distance*, on remarquera qu'elle est en contradiction formelle avec le principe de l'égalité de l'action et de la réaction en ce qui concerne l'action réciproque d'un élément de courant et d'un aimant (loi de Laplace). Nous nous placerons donc au point de vue des idées plus rationnelles sur lesquelles est fondée la théorie de l'élasticité; c'est-à-dire que nous admettrons que les actions ont lieu *au contact* et se propagent de proche en proche, de telle sorte que, dans l'expression de la force à laquelle est soumis un élément de volume d'un corps, il n'intervienne que l'état du champ au point où se trouve cet élément.

Avant d'aborder le cas général, nous étudierons successivement le cas particulier d'un champ électrique, puis celui d'un champ magnétique.

CHAMP ÉLECTRIQUE.

2. *Principe de la méthode.* — Considérons un champ électrique quelconque, constitué par des conducteurs électrisés C_1, C_2... et par un diélectrique D interposé entre eux (*fig.* 1). La matière contenue dans un élé-

ment de volume tel que $a'b'b''a''$ est soumise à des forces qui varient avec l'état électrique du champ. Au lieu de regarder ces forces comme développées à dis-

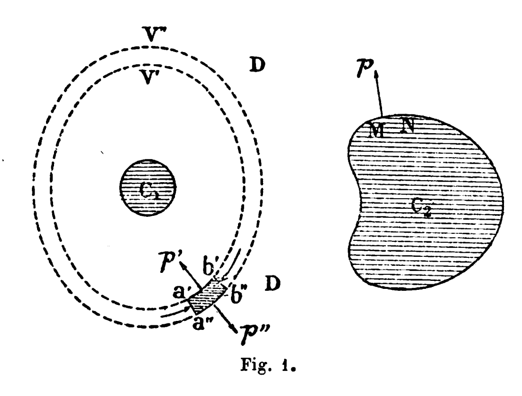


Fig. 1.

tance par les diverses masses électriques, nous les supposerons exercées par le milieu directement *en contact* avec l'élément de volume en question. Ainsi, ce volume subira sur ses faces $a'b'$, $a'b''$, par exemple, des tensions p' p'', et sur d'autres faces des pressions (figurées par des flèches); c'est la résultante de toutes ces tensions ou pressions, s'exerçant à sa surface, qui agira sur la matière du volume $a'b'b''a''$. Il suffirait donc, pour savoir calculer la force mécanique à laquelle est soumise une parcelle quelconque d'un corps dans le champ, de connaître les forces qui s'exercent sur chaque élément de sa surface. Or, cette connaissance résulte d'une loi très simple que nous allons exposer.

Tout d'abord, nous rappellerons un résultat simple et bien connu de la théorie mathématique de l'électrostatique. En désignant par σ la densité électrique en un point M de la surface d'un conducteur électrisé C_2 (*fig.* 1), on sait que l'action mécanique produite sur ce conducteur par suite de son électrisation consiste en

une tension s'exerçant sur chaque élément MN de sa surface normalement à cet élément (de l'intérieur vers l'extérieur), la tension p par unité de surface au point M étant donnée par la formule

$$p = 2\pi k \sigma^2.$$

Le coefficient k est celui de la formule fondamentale de Coulomb en électrostatique (inverse du pouvoir inducteur du diélectrique) et *ne dépend que de la nature du diélectrique au contact du conducteur.* Ajoutons que l'on peut donner encore à p l'expression suivante :

$$(1) \qquad p = \frac{f^2}{8\pi k},$$

f désignant l'*intensité* (communément appelée *force électrique*) du champ électrique au point M, laquelle est liée à la densité électrique σ par la formule

$$f = 4\pi k \sigma.$$

Ceci rappelé, remarquons que la tension p, étant exercée sur le conducteur par le milieu diélectrique directement en contact avec lui, doit être égale — en vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction — à l'action réciproque exercée par le conducteur sur le diélectrique. Il en résulte qu'en chaque point de sa surface de contact avec les divers conducteurs, le diélectrique est soumis à une tension normale p définie par l'équation (1) et dirigée vers l'intérieur des conducteurs.

L'ensemble des forces exercées aux divers points de la surface du diélectrique étant ainsi bien défini, la recherche des forces développées à l'intérieur de celui-ci n'est plus qu'un problème d'élasticité dont la solution est d'ailleurs considérablement facilitée par la

connaissance des propriétés mathématiques des surfaces équipotentielles. On peut donc calculer la grandeur et la direction de la force qui s'exerce sur tout élément de la surface d'une parcelle quelconque du diélectrique. La règle relative au calcul de cette force est remarquablement simple; je me contenterai de l'énoncer, renvoyant le lecteur, pour la démonstration, à mon *Traité d'électricité et de magnétisme* (t. I, § 45) :

Soit s un élément infiniment petit de la surface S d'une parcelle du diélectrique (*fig.* 2), ON la normale extérieure à cet élément, Of un segment de droite représentant en grandeur et direction l'intensité f du champ électrique au point M. La force p qui s'exerce sur l'unité de surface au point O de la parcelle considérée est définie : 1° en grandeur, par la formule

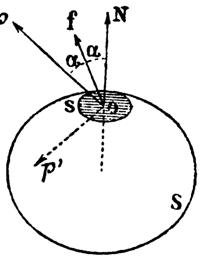


Fig. 2.

$$p = \frac{f^2}{8\pi k};$$

2° en direction, par la condition que Of soit la bissectrice de l'angle 2α formé par cette direction Op et par la normale ON.

Ainsi, la grandeur de la force p est indépendante de l'orientation de l'élément s de surface de la parcelle considérée. Quant à la direction Op de cette force, elle varie avec cette orientation, c'est-à-dire avec l'angle α que fait la normale ON à la surface avec la direction Of du champ au point O. Si α est inférieur à 45°, 2α sera inférieur à 90°, et la force p sera dirigée vers l'extérieur, c'est-à-dire sera une *tension* exercée sur la surface. Si, au contraire, α est supérieur à 45°, 2α sera

supérieur à 90°, et la force p' sera une *pression* (*fig.* 2). Ces tensions et pressions sont d'ailleurs obliques en général; et, dans le cas particulier où $\alpha = 45°$, la force est parallèle à la surface, c'est-à-dire qu'elle tend à faire glisser la parcelle considérée le long de la surface de contact s de la parcelle contiguë.

Il convient d'examiner particulièrement les cas importants où α est égal à zéro ou à 90°.

Si $\alpha = 0$, s est un élément de surface équipotentielle. Il en résulte que, sur tout élément équipotentiel de sa surface, la parcelle considérée subit de la part de la parcelle contiguë une *tension normale* égale à $\frac{f^2}{8\pi k}$.

Si $\alpha = 90°$, s est un élément de surface d'un *tube de force*. Sur un tel élément, l'action réciproque de deux parcelles voisines est une *pression normale*, égale à $\frac{f^2}{8\pi k}$ par unité de surface.

Sur la *fig.* 1, V′ et V″ représentent deux surfaces équipotentielles tracées (en pointillé) dans le milieu diélectrique. Le volume $a'b'b''a''$ est un tube de force qui subit des tensions normales p' p'' sur ses deux bases équipotentielles et des pressions normales sur sa surface latérale.

Si l'on applique à chacun des éléments de la surface S (*fig.* 2) la règle énoncée plus haut, on voit que l'on pourra calculer la force résultante à laquelle est soumis, de la part du champ électrique, le volume limité par S. C'est là le principe de la méthode que nous allons appliquer. Mais la règle invoquée ayant été démontrée dans le cas d'un champ électrique en équilibre et d'un milieu homogène, il convient d'abord d'en justifier la généralisation.

3. En premier lieu, la règle s'étend à tous les corps diélectriques ou conducteurs où existe un champ électrique. Si nous ne l'avons appliquée ci-dessus qu'au milieu diélectrique, c'est que nous supposions implicitement l'équilibre électrique atteint, auquel cas le champ électrique est nul dans les conducteurs ($f=0$) et par suite les forces $p=\frac{f^2}{8\pi k}$ sont nulles aussi. Mais nous n'avons aucune raison de distinguer, au point de vue qui nous occupe, les conducteurs des diélectriques, d'autant plus que la distinction tranchée que l'on fait quelquefois entre eux est purement conventionnelle et non naturelle.

En second lieu, l'expression $\frac{f^2}{8\pi k}$ de la force p qui s'exerce en un point O sur un élément s de surface infiniment petit ne dépend que des valeurs de f et de k au point O. Il paraît donc rationnel d'admettre que, même lorsque le champ n'est pas en équilibre et lorsque le milieu n'est pas homogène, la force exercée sur l'élément s de surface au point O ne dépend que de l'état du champ et de la nature du milieu en ce point, c'est-à-dire ne dépend que de f et de k et nullement de leurs dérivées par rapport aux coordonnées x, y, z. Il en résulte que la règle générale relative au calcul de cette force ne peut différer de celle qui a été énoncée plus haut. Nous sommes dès lors en mesure de faire la théorie générale des actions mécaniques en question sans recourir préalablement à l'expérience ni introduire des hypothèses auxiliaires. Cette théorie, précédant l'expérience sur bien des points, servira de guide dans l'étude expérimentale des actions mécaniques propres aux champs variables. Et l'expérience à

son tour montrera ultérieurement si la théorie rend compte de tous les phénomènes observés ou si elle a négligé certaines actions inconnues jusqu'ici.

4. *Établissement de quelques formules* (*). — Nous allons d'abord calculer, dans un système de coordonnées cartésiennes, les formules qui expriment la règle énoncée au paragraphe précédent.

Soit A un point dont les cordonnées par rapport à trois axes rectangulaires Ox, Oy, Oz (*fig.* 3) sont x, y, z;

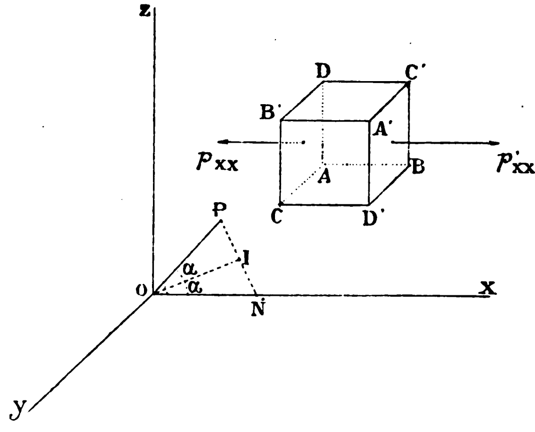


Fig 3.

f l'intensité du champ électrique en ce point et X, Y, Z les composantes de f suivant les trois axes. Considérons en A un élément plan s de surface perpendiculaire à Ox, faisant partie de la surface qui limite un certain volume. La force qui s'exerce sur l'unité de surface de cet élément est, comme nous le savons,

(*) Les formules de ce paragraphe ont été données par Maxwell (*Électrostatique, chap. V*), qui le premier a traduit en langage mathématique les idées de Faraday relatives aux actions électriques considérées dans le diélectrique. Il est inutile d'ajouter que c'est l'idée de Maxwell que nous avons tâché de développer dans cette note.

$p = \frac{f^2}{8\pi k}$. Portons des longueurs OP et ON égales à p sur des parallèles menées par l'origine O : 1° à la force p qui s'exerce sur l'élément s; 2° à la normale à cet élément, laquelle est par hypothèse, parallèle à Ox. Si I est le milieu de PN, OI est la bissectrice de l'angle NOP et, par conséquent, est parallèle, d'après la règle, à la direction de l'intensité f du champ au point A.

Pour exprimer cette propriété, désignons par p_x la force p pour indiquer qu'elle s'exerce sur un élément orienté perpendiculairement à Ox, et par p_{xx}, p_{xy}, p_{xz} les composantes de cette force suivant Ox, Oy, Oz. Les coordonnées du point I, milieu de NP, sont évidemment :

$$\frac{1}{2}(p_x + p_{xx}); \qquad \frac{1}{2}p_{xy}; \qquad \frac{1}{2}p_{xz}$$

et comme, d'autre part, les composantes de l'intensité f, qui est parallèle à OI, sont X, Y, Z, il en résulte :

$$\frac{p_x + p_{xx}}{X} = \frac{p_{xy}}{Y} = \frac{p_{xz}}{Z}.$$

D'autre part, en écrivant l'égalité des cosinus des angles POI et ION, on aura :

$$\frac{p_{xx}}{p_x}\frac{X}{f} + \frac{p_{xy}}{p_x}\frac{Y}{f} + \frac{p_{xz}}{p_x}\frac{Z}{f} = \frac{X}{f}.$$

De ces trois relations, on déduit :

$$(2) \qquad \begin{cases} p_{xx} = \frac{1}{8\pi k}(X^2 - Y^2 - Z^2), \\ p_{xy} = \frac{1}{8\pi k}\, 2XY, \\ p_{xz} = \frac{1}{8\pi k}\, 2XZ. \end{cases}$$

Si, au lieu de p_x, on considérait la force p_y (égale à p_x) s'exerçant sur un élément de surface perpendiculaire à Oy, on trouverait pour ses composantes p_{yx}, p_{yy}, p_{yz} des expressions se déduisant des précédentes par l'inversion des lettres x et y, X et Y. De même pour p_z.

On remarquera les identités :

$$(2') \quad \begin{cases} p_{xy} = p_{yx} = \dfrac{1}{8\pi k} \; 2XY, \\ p_{xz} = p_{zx} = \dfrac{1}{8\pi k} \; 2XZ, \end{cases}$$

p_{yx} et p_{zx} désignant les composantes suivant Ox des forces p_y et p_z qui s'exercent sur des éléments plans perpendiculaires respectivement à Oy et à Oz.

5. *Calcul de la force à laquelle est soumis un corps par unité de volume dans un champ électrique.* — Appliquons les formules précédentes à un corps ayant la forme d'un parallélipipède rectangle ABCD A'B'C'D (*fig.* 3), dont les arêtes AB $= dx$, AC $= dy$, AD $= dz$ sont infiniment courtes et parallèles à Ox, Oy, Oz; et calculons la résultante des forces qui s'exercent sur les six faces du parallélipipède.

Accouplons d'abord les deux faces ACB'D, A'C'BD', perpendiculaires à Ox, dont l'aire commune est $dy\,dz$, et dont les abscisses respectives sont x et $x + dx$. La composante suivant Ox de la tension p_x, qui s'exerce sur l'unité de surface de la première étant p_{xx}, on aura, pour la seconde, $p'_{xx} = p_{xx} + \dfrac{d}{dx}(p_{xx})\,dx$. De telle sorte que la résultante suivant Ox sera pour l'ensemble de ces deux faces, en tenant compte des signes :

$$-p_{xx}\,dy\,dz + \left[p_{xx} + \frac{\partial}{\partial x}(p_{xx})\,dx\right] dy\,dz = \frac{\partial p_{xx}}{\partial x}\,dx\,dy\,dz.$$

De même les deux faces perpendiculaires à Oy donneront comme résultante suivant Ox :

$$-p_{yx}\,dz\,dx + \left[p_{yx} + \frac{\partial}{\partial y}(p_{yx})\,dy\right] dz\,dx = \frac{\partial p_{yx}}{\partial y}\,dx\,dy\,dz$$

et les faces perpendiculaires à Oz :

$$-p_{zx}\,dx\,dy + \left[p_{zx} + \frac{\partial}{\partial z}(p_{zx})\,dz\right] dx\,dy = \frac{\partial p_{zx}}{\partial z}\,dx\,dy\,dz.$$

La résultante totale suivant Ox est donc :

$$F_x\,dx\,dy\,dz = \left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z}\right) dx\,dy\,dz.$$

Par suite, en tenant compte de (2) et (2′) :

$$F_x = \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z}$$
$$= \frac{1}{8\pi}\left[\frac{\partial}{\partial x}\,\frac{X^2 - Y^2 - Z^2}{k} + \frac{\partial}{\partial y}\,\frac{2XY}{k} + \frac{\partial}{\partial z}\,\frac{2XZ}{k}\right],$$

$$F_x = \frac{X}{4\pi}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{X}{k}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{Y}{k}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{Z}{k}\right)\right] - \frac{f^2}{8\pi}\,\frac{\partial\left(\frac{1}{k}\right)}{\partial x}$$
$$+ \left[\frac{Y}{4\pi k}\left(\frac{\partial X}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial x}\right) - \frac{Z}{4\pi k}\left(\frac{\partial Z}{dx} - \frac{\partial X}{\partial z}\right)\right].$$

Si donc on pose, pour abréger :

$$(3)\quad \begin{cases} 4\pi\rho = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{X}{k}\right) + \dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{Y}{k}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{Z}{k}\right) \\ 4\pi\mu_x = \dfrac{\partial Y}{\partial z} - \dfrac{\partial Z}{\partial y};\ 4\pi\mu_y = \dfrac{\partial Z}{\partial x} - \dfrac{\partial X}{\partial z};\ 4\pi\mu_z = \dfrac{\partial X}{\partial y} - \dfrac{\partial Y}{\partial x}, \end{cases}$$

on aura, pour les composantes de la résultante F par unité de volume :

$$(4)\quad \begin{cases} F_x = X\rho - \dfrac{f^2}{8\pi}\,\dfrac{\partial\left(\frac{1}{k}\right)}{\partial x} + \dfrac{Y\mu_z - Z\mu_y}{k}, \\ F_y = Y\rho - \dfrac{f^2}{8\pi}\,\dfrac{\partial\left(\frac{1}{k}\right)}{\partial y} + \dfrac{Z\mu_x - X\mu_z}{k}, \\ F_z = Z\rho - \dfrac{f^2}{8\pi}\,\dfrac{\partial\left(\frac{1}{k}\right)}{\partial z} + \dfrac{X\mu_y - Y\mu_x}{k}. \end{cases}$$

6. Voici la traduction de ces formules en langage ordinaire. La force F que le champ électrique exerce par unité de volume en un point A d'un corps quelconque peut être considérée comme la résultante des trois suivantes :

1° Une première force :

$$F_\rho = f\rho \tag{5}$$

ayant pour direction celle de l'intensité ou force électrique f du champ au point A, et pour grandeur le produit de cette intensité f par la densité électrique ρ au même point (composantes : $X\rho$, $Y\rho$, $Z\rho$) ;

2° Une deuxième force :

$$F_k = -\frac{f^2}{8\pi}\frac{\partial\left(\frac{1}{k}\right)}{\partial n} = \frac{f^2}{8\pi k}\ \frac{\partial k}{k\partial n} \tag{6}$$

dirigée dans le sens où le pouvoir inducteur $\frac{1}{k}$ du diélectrique décroît le plus rapidement — en supposant, bien entendu, le milieu hétérogène — et proportionnelle, d'une part à cette décroissance relative $\frac{dk}{kdn}$, d'autre part à la tension $p = \frac{f^2}{8\pi k}$ au point A ;

3° Enfin une force :

$$F\mu = \frac{1}{k} f\mu \sin\theta \tag{7}$$

qui dépend d'un nouvel élément, savoir le vecteur μ dont les composantes sont μ_x, μ_y, μ_z et dont il a été question dans une précédente note (juillet-août) sous le nom de *densité de masse vectorielle électrique*. La force F_μ est dirigée perpendiculairement au plan des vecteurs f et μ, et elle est proportionnelle à l'aire du parallélo-

gramme construit sur f et μ comme côtés, θ désignant l'angle de ces deux vecteurs.

Dans un diélectrique homogène ($k =$ constante, et $\frac{dk}{dn} = 0$) non électrisé ($\rho = 0$), si le champ électrique est en équilibre, c'est-à-dire si l'on a :

$$\mu_x = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{\partial Y}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial y}\right) = 0; \quad \mu_y = 0; \quad \mu_z = 0,$$

les trois composantes F_ρ, F_k, F_μ sont nulles. Par conséquent la force F est nulle elle-même, et une parcelle quelconque du diélectrique reste en équilibre sous l'action des tensions ou pressions $p = \frac{f^2}{8\pi k}$ qui s'exercent aux divers points de sa surface. Ces tensions ou pressions ont seulement pour effet de déformer la parcelle en question et peut-être d'altérer ses propriétés physiques ; mais nous n'aborderons point ici l'étude de ces déformations, sujet très délicat.

Si le diélectrique est électrisé ($\rho \gtrless 0$), en supposant toujours le milieu homogène et l'équilibre atteint, la force F se réduit à la composante $F_\rho = f\rho$; on retrouve ainsi le même résultat que par l'application de la loi de Coulomb.

Lorsque l'état d'équilibre du champ électrique n'est pas atteint — et c'est le cas général — nous constatons l'existence d'une nouvelle force F_μ que la loi de Coulomb ne peut faire prévoir. Cette force ne paraît pas avoir jamais été étudiée ni reconnue expérimentalement, à cause des difficultés que présente l'étude des forces électriques dans l'état variable. Elle met en évidence la densité μ de masse vectorielle électrique, dont nous constatons de nouveau l'importance, analogue à celle de la densité ρ de masse électrique.

Enfin si le milieu diélectrique (ou conducteur) n'est pas homogène, il se développe de ce fait une nouvelle force F_k, obéissant à une loi tout autre que celle que l'on aurait pu supposer en admettant l'ancienne théorie de l'électricité induite. *La direction de cette force est* en effet *indépendante de celle de l'intensité f du champ*, puisqu'elle coïncide avec la direction dans laquelle le pouvoir inducteur $\frac{1}{k}$ du diélectrique décroît le plus rapidement. La formule : $F_k = \frac{f^2}{8\pi k} \frac{dk}{kdn}$ suppose que k varie d'une manière continue ; mais il est facile de l'étendre au cas d'une variation discontinue, en assimilant celle-ci à une variation continue extrêmement rapide, ce qui n'entraîne aucune erreur. Ainsi, dans le cas où deux corps D_1 et D_2 homogènes, ayant pour coefficients k_1 et $k_2 < k_1$ $\left(\text{ou} \frac{1}{k_2} > \frac{1}{k_1}\right)$, sont en contact par une surface s, le champ électrique crée — dans une couche mince comprenant la surface s et empiétant sur les deux corps — une force

$$\int \frac{f^2}{8\pi k^2} \frac{dk}{dn} dn$$

du genre F_k, qui est *normale à la surface s* quelle que soit la direction du champ f, et qui pousse le corps D_2 vers D_1 (D_1 sera, par exemple, de l'air, et D_2 un liquide ou un solide).

CHAMP MAGNÉTIQUE.

7. On sait quelle étroite analogie existe entre la théorie de l'Électrostatique et celle du Magnétisme. La même analogie se poursuit dans l'étude des forces

exercées sur un corps par les champs électrique et magnétique. Nous pourrions répéter au sujet du champ magnétique, en changeant quelques mots, ce que nous avons dit dans les paragraphes précédents. Il en résulte qu'en remplaçant f, X, Y, Z, ρ, μ par les quantités analogues f_m (intensité du champ magnétique), X_m, Y_m, Z_m, ρ_m (densité de masse magnétique) et μ_m (densité de masse vectorielle magnétique), nous pourrions écrire de nouvelles formules analogues à (3), (4), (5), (6), (7). Écrivons ces trois dernières, en remplaçant du reste le coefficient électrique k du milieu par son coefficient magnétique k' :

$$(5') \qquad F_{\rho_m} = f_m \rho_m,$$

$$(6') \qquad F_{k'} = -\frac{f_m^2}{8\pi} \frac{\partial\left(\frac{1}{k'}\right)}{\partial n},$$

$$(7') \qquad F_{\mu_m} = \left(\frac{1}{k'}\right) f_m \mu_m \sin\theta.$$

La force F_m, qui s'exerce sur l'unité de volume en un point d'un corps sous l'action d'un champ magnétique, est donc la résultante de trois forces : l'une, $F_{\rho m}$ qui a la direction du champ f_m ; la seconde F_k, qui est créée par l'hétérogénéité du milieu et dont la direction est celle dans laquelle le pouvoir inducteur magnétique $\left(\frac{1}{k'}\right)$ décroît le plus rapidement ; la troisième $F_{\mu m}$, perpendiculaire à la direction du champ f_m et à celle de la densité μ_m de masse vectorielle magnétique, et égale, au facteur $\frac{1}{k'}$ près, à l'aire du parallélogramme construit sur les vecteurs f_m et μ_m comme côtés. La loi de Coulomb rend compte de la première de ces forces, mais ne peut faire prévoir les deux autres.

Lorsqu'un champ électrique et un champ magnétique sont superposés, on sait que les actions mécaniques qu'ils exercent sur les corps sont indépendantes entre elles. Ainsi les tensions ou pressions $p = \frac{f^2}{8\pi k}$ ou $\frac{f_m^2}{8\pi k'}$, qui nous ont servi de point de départ, ont en chaque point une résultante égale à leur somme géométrique. Par conséquent la force que subit le milieu diélectrique (ou conducteur) par unité de volume sera la résultante des forces calculées par les formules (5), (6), (7), (5'), (6') et (7').

CHAMPS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE ET ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

8. Ces champs sont purement et simplement des champs magnétiques à tous les points de vue. Ainsi nous avons vu dans la précédente note (juillet-août) que l'expérience de Biot et Savart suffit pour constater l'identité de la densité μ_m de masse vectorielle magnétique et de la densité i du courant, au moins dans le cas d'un courant permanent. De là on déduit entièrement la théorie des actions des courants et des aimants. Nous allons notamment en faire ressortir une conséquence importante, en appliquant au champ d'un courant la formule (7'), *qui a été calculée pour un champ magnétique*, et en calculant ainsi *a priori*, sans le secours de l'expérience, l'action d'un champ magnétique quelconque sur un élément de courant.

Considérons un conducteur parcouru par un courant permanent dont la densité en un point A est i. Si f_m désigne l'intensité du champ magnétique (due au courant lui-même, à des aimants, etc.) au même point, la force mécanique $F_{\mu m}$ qui s'exerce en A sur l'unité de

volume est donnée par la formule (7'), ou bien, en vertu de l'identité des vecteurs μ_m et i, par

$$F_{\mu m} = \frac{1}{k'} f_m i \sin \theta.$$

Cette force est perpendiculaire à la direction du champ magnétique f_m *et à celle du courant* i, *et elle est proportionnelle à l'intensité* f_m *du champ, à la densité* i *du courant et au sinus de l'angle* θ *que fait le courant avec le champ.* Quant au sens de cette force sur la perpendiculaire au plan des vecteurs f_m et i, on le déduit facilement des formules (4) ; et l'on vérifie que la force ainsi calculée *a priori* est identique à celle que l'on constate expérimentalement.

Cette vérification est d'autant plus remarquable que, dans la masse du conducteur parcouru par le courant, le champ magnétique n'a pas de potentiel, les quantités

$$4\pi\mu_x = \frac{\partial Y_m}{\partial z} - \frac{\partial Z_m}{\partial y}, \qquad 4\pi\mu_y, \qquad 4\pi\mu_z$$

n'étant pas nulles. On se trouve ainsi dans un cas où notre théorie n'est applicable qu'en vertu de la généralisation, admise au paragraphe 3, de la règle énoncée au paragraphe 2. Cette généralisation est donc entièrement justifiée, au moins dans le cas des courants permanents.

CHAMP ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE QUELCONQUE.

9. *Actions mécaniques dans un champ électrique et magnétique variable.* — D'après ce que nous avons dit dans les paragraphes précédents, la force F qui s'exerce,

en un point d'un corps, sur l'unité de volume dans un champ quelconque, est la résultante des forces données par les formules (5), (6), (7), (5'), (6'), (7'), dans lesquelles l'intensité magnétique f_m du champ peut être due à des causes dites purement magnétiques, ou électro-magnétiques, ou électro-dynamiques sans distinction aucune. Il convient d'insister un peu sur le cas le plus intéressant et le plus obscur, où l'état du champ, au lieu d'être stable, varie avec une rapidité quelconque.

Pour étudier particulièrement ce cas, nous supposerons que le corps, diélectrique ou conducteur, est homogène et ne contient ni masses électriques ($\rho = 0$) ni masses magnétiques ($\rho_m = 0$). Alors les forces F_ρ, $F_{\rho m}$, F_k et $F_{k'}$ sont nulles. Il ne reste que les forces F_μ et $F_{\mu m}$; et, par conséquent, en vertu des formules (4), les composantes de la force résultante F suivant Ox, Oy, Oz, sont :

$$F_x = \frac{Y\mu_z - Z\mu_y}{k} + \frac{Y_m(\mu_m)_z - Z_m(\mu_m)_y}{k'}; \quad F_y = \ldots \quad F_z = \ldots$$

Ces formules seront susceptibles d'une interprétation remarquable, si l'on tient compte des relations suivantes qui, d'après la théorie de Maxwell (voir les traités) existent entre les dérivées partielles des intensités électrique f et magnétique f_m du champ :

$$(8) \quad \frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{1}{k'} \frac{\partial X_m}{\partial t}; \quad \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial x} = \ldots \quad \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial y} = \ldots$$

$$(9) \quad \left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial Y_m}{\partial z} - \frac{\partial Z_m}{\partial y} = \frac{1}{k} \frac{\partial X}{\partial t} + 4\pi \frac{X}{R}; \\ & \frac{\partial Z_m}{\partial x} - \frac{\partial X_m}{\partial z} = \ldots \quad \frac{\partial X_m}{\partial y} - \frac{\partial Y_m}{\partial x} = \ldots \end{aligned} \right.$$

R désignant la résistance électrique spécifique du milieu et $\frac{d}{dt}$ étant le symbole de la dérivée par rapport

au temps t. — On sait que de ces relations découle la théorie de la propagation des ébranlements électro-magnétiques.

La formule de F_x devient ainsi, en remplaçant μ_x, μ_y,.... par leurs expressions (3):

$$\begin{aligned}4\pi F_x &= \frac{Y}{k}\left(\frac{\partial X}{\partial y}-\frac{\partial Y}{\partial x}\right)-\frac{Z}{k}\left(\frac{\partial Z}{\partial x}-\frac{\partial X}{\partial z}\right)\\ &\quad+\frac{Y_m}{k'}\left(\frac{\partial X_m}{\partial y}-\frac{\partial Y_m}{\partial x}\right)-\frac{Z_m}{k'}\left(\frac{\partial Z_m}{\partial x}-\frac{\partial X_m}{\partial z}\right)\\ &=\frac{1}{kk'}\left[-Y\frac{\partial Z_m}{\partial t}+Z\frac{\partial Y_m}{\partial t}+Y_m\frac{\partial Z}{\partial t}-Z_m\frac{\partial Y}{\partial t}\right]\\ &\quad+\frac{4\pi}{k'R}(Y_m Z-YZ_m)\\ &=\frac{1}{kk'}\frac{\partial}{\partial t}(Y_m Z-Z_m Y)+\frac{4\pi}{k'R}(Y_m Z-Z_m Y).\end{aligned}$$

Si l'on pose :

$$(10)\qquad kk'=a^2 \qquad R=4\pi k\theta$$

et si l'on considère un vecteur w dont les composantes w_x, w_y, w_z sont définies par les formules :

$$(11)\quad 4\pi w_x = Y_m Z - Z_m Y;\quad 4\pi w_y = Z_m X - X_m Z;\quad 4\pi w_z = X_m Y - Y_m X,$$

on aura, pour les composantes de la force cherchée F :

$$(12)\ a^2 F_x = \frac{w_x}{\theta}+\frac{\partial w_x}{\partial t};\ a^2 F_y = \frac{w_y}{\theta}+\frac{\partial w_y}{\partial t};\ a^2 F_z = \frac{w_z}{\theta}+\frac{\partial w_z}{\partial t}.$$

En résumé, la force F par unité de volume peut être considérée comme la résultante de deux forces :

L'une, ayant la direction du vecteur w et égale à $\frac{w}{a^2\theta}$, n'existe que dans les conducteurs (puisque $\theta = \frac{R}{4\pi k}$ est infini dans les non-conducteurs) et est liée à l'existence d'un courant ;

L'autre, égale en grandeur et en direction à la dérivée

géométrique $\frac{dw}{dt}$ du vecteur w (au facteur $\frac{1}{a^2}$ près), est due à la variation du champ au point considéré.

Ce vecteur w, dont la connaissance suffit ainsi pour calculer la force F à un instant quelconque, joue également un rôle très important au point de vue de la transmission de l'énergie d'une partie à une autre du champ, comme on le verra dans une prochaine note. Sa définition géométrique résulte de l'interprétation des formules (11). Soient Of_m et Of (*fig.* 4) deux vecteurs représentant, en grandeur et direction, les intensités magnétique et électrique du champ au point O. La grandeur de w est égale à l'aire $f_m f \sin \theta$ du parallélogramme construit sur f_m et f comme côtés, divisée par 4π ; sa direction est celle de la normale au plan des vecteurs f et f_m. Quant au sens Ow suivant lequel on doit porter w sur cette normale, il est tel que pour un observateur placé le long de Ow, les pieds en O et la tête en w, la droite Of_m doive tourner de gauche à droite autour de O pour décrire l'angle θ (inférieur à 180°) et venir s'appliquer sur Of. — Remarquons en passant que le vecteur w ne dépend que de l'intensité et de l'orientation *actuelles* des champs électrique f et magnétique f_m au point O.

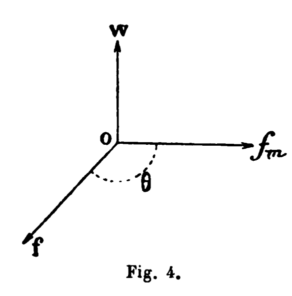


Fig. 4.

10. *Applications.* — L'application des formules (12) au calcul de la force totale (et du couple, s'il y a lieu) qui agit sur un corps de dimensions quelconques exige évidemment la connaissance préalable de l'intensité du champ en tous les points du corps. Le problème est

donc très compliqué en général ; mais il est susceptible d'une solution simple dans un grand nombre de cas facilement réalisables. En voici un exemple.

Imaginons un bloc parallélipipédique rectangle de résine ou de toute autre substance isolante ABCDA′B′C′D′ (*fig.* 5), ayant son arête AC verticale et placé à la fois dans un champ électrique uniforme f vertical et dans un champ magnétique uniforme f_m horizontal. Ce bloc est suspendu, par exemple, par un fil, de manière à obéir à toute impulsion horizontale. — Si l'on vient à supprimer brusquement le champ magnétique (suppression du courant dans un électro-aimant producteur du champ) *sans variation du champ électrique*, le bloc subira une impulsion que l'on peut calculer *a priori*. L'observation du déplacement et des oscillations du bloc permettra donc une vérification expérimentale de la théorie. Voici le calcul de l'impulsion.

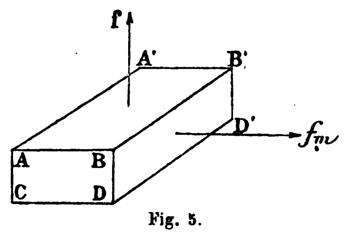


Fig. 5.

Avant la suppression du champ magnétique f_m, que nous supposons parallèle à l'arête AB, le vecteur w est, comme f et f_m, constant en grandeur et en direction en tous les points du bloc. Sa grandeur w_0 est évidemment celle du produit $\frac{1}{4\pi} f f_m$, puisque f et f_m sont perpendiculaires entre eux :

$$w_0 = \frac{1}{4\pi} f f_m$$

sa direction est celle de la troisième arête AA′ dans le sens AA′. Lorsque le champ magnétique est supprimé, f_m étant nul, la nouvelle valeur w_1 de w est également

nulle. — Ceci posé, remarquons que, pour le bloc isolant en question, θ est infini et que la force F qui agit sur l'unité de volume se réduit, d'après les formules (12) à :

$$F = \frac{1}{a^2} \frac{dw}{dt}.$$

Cette formule étant exacte à un instant quelconque de la période constante ou variable du champ magnétique, on aura en l'intégrant entre les deux époques initiale t_0 et finale t_1 où le vecteur w a les valeurs respectives w_0 et w_1 :

$$(13) \qquad \int_{t_0}^{t_1} F\,dt = \frac{1}{a^2} \int_{t_0}^{t_1} \frac{dw}{dt}\,dt = \frac{1}{a^2}(w_1 - w_0).$$

Or $\int_{t_0}^{t_1} F\,dt$ désigne précisément l'impulsion totale de la force F pendant la période variable. Donc, si V désigne le volume total du bloc, l'impulsion totale qu'il reçoit dans le sens A A′ est égale à :

$$(14) \qquad V \int_{t_0}^{t_1} F\,dt = -\frac{V}{4\pi a^2} f f_m.$$

Le signe — indique qu'en réalité l'impulsion est dirigée de A′ vers A.

La complication de la période variable de suppression du champ magnétique est, comme on le voit, sans influence sur la formule (14). Le calcul de l'impulsion n'exige que la détermination des intensités f et f_m du champ initial et la connaissance de la constante $a = \sqrt{kk'}$ de la substance employée. Toutefois, dans la vérification expérimentale de cette formule si simple, on devra avoir bien soin de tenir compte également des actions qui ont lieu dans le milieu ambiant (air, par exemple) que le bloc refoule par son déplacement.

On imaginera facilement d'autres cas auxquels sera applicable la formule (13), à la condition d'opérer sur des isolants. Les corps conducteurs ne se prêtent pas généralement à des expériences aussi simples sur la période variable d'un champ électro-magnétique : car, en intégrant les formules (12), on trouve :

$$a^2 \int_{t_0}^{t_1} \mathrm{F}\, dt = \frac{1}{\theta} \int_{t_0}^{t_1} w\, dt + w_1 - w_0$$

et, si le terme $(w_1 - w_0)$ ne dépend que de l'état initial et de l'état final du champ, par contre la valeur de $\int_{t_0}^{t_1} w dt$ ne peut être calculée en général que si l'on connaît la loi de variation du champ entre les époques t_0 et t_1.

11. *Action réciproque d'un champ électrique et d'un champ magnétique l'un sur l'autre.* — Dans un corps isolant l'existence *simultanée* d'un champ électrique et d'un champ magnétique en équilibre stable ne produit aucune action nouvelle. Dans un conducteur, au contraire, cette simultanéité donne lieu à une force égale à :

$$\mathrm{F} = \frac{w}{a^2\theta} = \frac{1}{4\pi a^2 \theta} f_1 f_2 \sin \theta$$

qui est perpendiculaire au plan des directions des deux champs f_1 et f_2 ; cette force nouvelle est due à ce que le champ électrique crée dans le conducteur un courant (masse vectorielle magnétique).

Indépendamment de ce genre de force, il en existe un autre qui se développe dans tous les corps, conducteurs ou isolants, sous l'action des variations du champ. Ainsi, dans l'expérience citée au paragraphe précédent, la simultanéité d'un champ électrique *fixe f*

et d'un champ magnétique *variable* f_m crée dans le bloc soumis à l'expérience une nouvelle force $\frac{1}{a^2}\frac{dw}{dt}$

Le résultat de cette expérience serait le même si, au lieu de maintenir le champ électrique et de supprimer le champ magnétique, on supprimait le premier en maintenant le second. Il y a donc, en quelque sorte, une réaction d'un champ électrique fixe sur un champ magnétique variable ou d'un champ magnétique fixe sur un champ électrique variable.

On peut encore exprimer ceci d'une autre manière dans le langage de la théorie des actions à distance. Dans l'expérience du paragraphe précédent, on considèrera le champ électrique f comme dû aux masses électriques réparties sur les conducteurs voisins. D'autre part, sous l'action du champ magnétique, le bloc soumis à l'expérience est un aimant. *Les masses électriques agissent donc sur l'aimant*, non pas lorsque l'aimantation de celui-ci reste constante, mais *pendant ses variations*. C'est ce genre d'action que nous avons signalé dans une note antérieure (*).

VASCHY.

(*) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 6 juin 1887; *Annales télégraphiques*, 1887, p. 334.

RECHERCHES SUR LES DIÉLECTRIQUES

Je me propose d'étudier dans ce travail un cas particulier et très simple de la théorie des diélectriques. Je suppose que, dans un champ produit par un seul point électrisé A, on place un diélectrique à faces parallèles et infinies, et je vais chercher comment se trouve modifié, par l'interposition de cette lame isolante, le potentiel en un point du champ séparé par elle du point électrisé A. Afin de simplifier, je me bornerai à considérer, au moins dans ce premier travail, un point situé sur la perpendiculaire abaissée de A sur le diélectrique.

Expression du potentiel dans la théorie de Thomson. — J'appliquerai d'abord à ce cas la théorie de Thomson, qui est une des plus simples, et je chercherai ensuite si les résultats du calcul sont confirmés par l'expérience. Dans cette théorie, on admet qu'un diélectrique, primitivement à l'état neutre, placé dans un champ électrique, subit une polarisation semblable à celle qu'éprouve un corps magnétique sous l'action d'un champ magnétique. Dans le cas actuel, cela revient à admettre qu'il se forme sur les deux faces de la lame deux couches de polarisation égales et de signe contraire. Supposons le point A électrisé positivement; la face la plus voisine sera négative et la plus éloignée positive. Pour obtenir le potentiel en un point P, situé de l'autre côté de la lame, on peut supposer celle-ci

enlevée et la remplacer dans le calcul par les deux couches de polarisation développées sur ses faces. Le potentiel en P sera donc celui qui résulte : 1° de l'action du point électrisé A; 2° de celle des deux couches de polarisation.

Soient :

e l'épaisseur du diélectrique;
a la distance de A à la première face (la plus voisine);
r la distance de P à l'autre face;
D la distance AP égale à $a + e + r$;
m la masse électrique de A;
μ la densité en un point de la première face du diélectrique situé à la distance ρ de l'axe AP;
μ' la densité en un point de la seconde face situé à la distance ρ' de AP.

Par raison de symétrie, la densité est la même en tous les points de la première face situés sur un cercle de rayon ρ ayant son centre sur l'axe AP. Si l'on considère la surface annulaire comprise entre ce cercle et celui de rayon $\rho + d\rho$, elle produit en P un potentiel

$$\frac{2\pi\mu\rho\, d\rho}{\sqrt{\rho^2 + p^2}},$$

en posant encore

$$p = r + e.$$

En raisonnant de même pour la seconde face, on voit que le potentiel en P est

$$(1)\quad V = \frac{m}{D} - 2\pi \int_0^\infty \mu \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + p^2}}\, d\rho + 2\pi \int_0^\infty \mu' \frac{\rho'}{\sqrt{\rho'^2 + r^2}}\, d\rho',$$

les densités μ et μ' étant prises en valeur absolue. Pour connaître V, il faut donc calculer d'abord ces deux densités.

Expression des densités de polorisation. — Soit φ_1 la *composante normale du champ total* en un point M de la première face du diélectrique, mais *à l'extérieur* de la plaque, et φ la même composante au même point, mais *à l'intérieur :* on a, d'après le théorème du flux d'induction, en appelant k la constante diélectrique de la plaque,

$$\varphi_1 = k\varphi.$$

D'après la théorie de Thomson,

$$\mu = i\varphi,$$

i étant le *coefficient d'électrisation* défini par l'équation

$$k = 1 + 4\pi i;$$

d'où

$$\mu = \frac{k-1}{4\pi}\varphi = \frac{k-1}{4\pi k}\varphi_1.$$

Mais il faut remarquer que φ représente la composante normale du champ *total*, c'est-à-dire la résultante de : 1° la composante normale A_n de l'action directe du point A ; 2° la composante normale X′ de l'action de la couche μ' ; 3° enfin celle de la couche μ elle-même, qui est, comme on le sait, $2\pi\mu$. Les deux dernières composantes sont de signe contraire à la première ; on a donc :

$$\mu = \frac{k-1}{4\pi}(A_n - X' - 2\pi\mu);$$

d'où

$$\mu = \frac{k-1}{k+1}\frac{1}{2\pi}(A_n - X')\ (*).$$

De même la densité en un point M′ de la seconde

(*) On arrive évidemment au même résultat en partant de la composante normale extérieure φ_1. En effet, si l'on passe de l'intérieur du diélectrique à l'extérieur, les trois composantes gardent la même valeur absolue, mais

face est

$$\mu' = \frac{k-1}{k+1}\frac{1}{2\pi}(A'_n - X).$$

en appelant A'_n la composante normale de l'action directe du point A et X celle de l'action de la couche μ au même point.

Décomposition des densités en sommes de densités partielles. — Pour calculer directement μ et μ', il faudrait connaître les composantes X et X', qui sont elles-mêmes des fonctions de ces quantités ; nous sommes donc réduits à calculer ces densités par approximations successives, en les regardant comme les sommes de densités partielles $\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_n$ et $\mu'_1, \mu'_2, \ldots, \mu'_n$, obtenues de la manière suivante : μ_1 et μ'_1 se calculent en considérant seulement la polarisation produite par le champ partiel A_n ou A'_n, dû à la seule charge de A ; μ_2 est la densité produite par le champ partiel dû à la couche μ'_1 de la seconde face ; μ'_2 provient du champ partiel dû à la couche μ_1 ; on continue de même, chaque densité se calculant au moyen du champ partiel dû à la couche de l'autre face dont la densité vient d'être calculée.

Les densités partielles des deux faces forment deux séries, pour chacune desquelles les termes sont alternativement positifs et négatifs, et vont en décroissant. Les séries sont donc convergentes, et leurs sommes

la dernière seule change de signe, puisqu'on traverse la couche de polarisation. Donc

$$\varphi_1 = A_n - X' + 2\pi\mu,$$

et

$$\mu = \frac{k-1}{4\pi k}(A_n - X' + 2\pi\mu);$$

$$\mu = \frac{k-1}{k+1}\frac{1}{2\pi}(A_n - X').$$

représentent bien les densités μ et μ' ; car, si l'on fait aussi les sommes des composantes normales des champs partiels liées aux densités par la relation générale

$$\mu_h = \frac{k-1}{k+1}\,\frac{X'_{h-1}}{2\pi},$$

on aura en ajoutant μ_1, due à l'action de A

$$\mu_1 + \sum \mu_h = \mu_1 + \frac{k-1}{k+1}\,\frac{1}{2\pi}\sum X'_{h-1} = \mu.$$

On aurait de même

$$\mu'_1 + \Sigma\, \mu'_h = \mu'.$$

Calculons maintenant les valeurs approchées de μ et de μ'. On peut obtenir d'abord une expression générale qui s'applique à toutes les densités partielles, sauf aux deux premières μ_1 et μ'_1. En effet, soit μ'_{n+1} la densité partielle d'ordre $n+1$ en un point de la seconde face situé à une distance ρ' de l'axe AP : elle est produite par la composante normale X_n du champ partiel dû à la couche μ_n de la première face. Un point de cette couche dont les coordonnées sont ρ et ω donne pour composante

$$\frac{\mu_n e \rho}{[(\rho\cos\omega - \rho')^2 + \rho^2\sin^2\omega + e^2]^{\frac{3}{2}}}\,d\rho\, d\omega.$$

D'où

$$(2)\quad X_n = e\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{\mu_n \rho}{[(\rho\cos\omega - \rho')^2 + \rho^2\sin^2\omega + e^2]^{\frac{3}{2}}}\,d\rho\, d\omega$$

et

$$(3)\quad \mu'_{n+1} = \frac{k-1}{k+1}\,\frac{e}{2\pi}\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{\mu_n \rho}{[(\rho\cos\omega - \rho')^2 + \rho^2\sin^2\omega + e^2]^{\frac{3}{2}}}\,d\rho\, d\omega.$$

La densité μ_{n+1} s'obtient par la même formule en remplaçant μ_n, ρ et ω par μ'_n, ρ' et ω' et ρ' par ρ. D'ail-

leurs μ'_{n+1} et μ_n sont toujours de même signe, ainsi que μ_{n+1} et μ'_n.

Calcul des premières densités μ_1 et μ'_1. — Ceci posé, calculons d'abord μ_1 et μ'_1, qui ne peuvent s'obtenir par la formule générale qui précède. On a évidemment en valeur absolue

$$A_n = \frac{ma}{(\rho^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}},$$

$$A'_n = \frac{mb}{(\rho'^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}};$$

en posant

$$b = a + e.$$

D'où

$$\mu_1 = \frac{k-1}{k+1} \frac{m}{2\pi} \frac{a}{(\rho^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}},$$

$$\mu'_1 = \frac{k-1}{k+1} \frac{m}{2\pi} \frac{b}{(\rho'^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Les deux premières couches donnent un potentiel nul. — Ces deux couches donneront, d'après l'équation (1), pour le potentiel en P les deux termes

$$-\frac{k-1}{k+1} ma \int_0^\infty \frac{\rho}{(\rho^2 + a^2)\sqrt{(\rho^2 + a^2)(\rho^2 + p^2)}} d\rho = -\frac{k-1}{k+1} \frac{m}{D} \text{ (*)}$$

et

$$+\frac{k-1}{k+1} mb \int_0^\infty \frac{\rho'}{(\rho'^2 + b^2)\sqrt{(\rho'^2 + b^2)(\rho'^2 + r^2)}} d\rho' = +\frac{k-1}{k+1} \frac{m}{D}.$$

Expression générale du potentiel. — Ainsi, les

(*) En posant

$$\sqrt{(\rho^2 + a^2)(\rho^2 + p^2)} = (\rho^2 + a^2)x,$$

l'intégrale devient

$$\int_{\frac{p}{a}}^1 \frac{dx}{a^2 - p^2} = \frac{1}{aD}.$$

La suivante donne de même $\frac{1}{bD}$.

deux termes que nous venons de calculer se détruisent et l'expression de V ne contient pas de terme en $\frac{k-1}{k+1}$. L'équation (1) peut donc s'écrire

$$(4)\quad V=\frac{m}{D}+\sum_2^\infty 2\pi(-1)^n\left[\int_0^\infty \frac{\mu_n \rho}{\sqrt{\rho^2+p^2}}d\rho-\int_0^\infty \frac{\mu'_n \rho'}{\sqrt{\rho'^2+r^2}}d\rho'\right].$$

Calcul des densités partielles μ_2 *et* μ'_2. — Nous avons maintenant à calculer le terme

$$+2\pi\left(\int_0^\infty \frac{\mu_2 \rho}{\sqrt{\rho^2+p^2}}d\rho-\int_0^\infty \frac{\mu'_2 \rho'}{\sqrt{\rho'^2+r^2}}d\rho'\right).$$

D'après (3)

$$\mu'_2=\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2\frac{mae}{4\pi^2}$$
$$\times\int_0^\infty\int_0^{2\pi}\frac{\rho}{(\rho^2+a^2)^{\frac{3}{2}}[(\rho\cos\omega-\rho')^2+\rho^2\sin^2\omega+e^2]^{\frac{3}{2}}}d\rho\, d\omega.$$

En se bornant aux quatre premiers termes de l'intégrale (*), on obtient la valeur approchée de μ'_2 :

(*) Voici ce calcul. Soit

$$B=\int_0^\infty\int_0^{2\pi}\frac{\rho}{(\rho^2+a^2)^{\frac{3}{2}}[(\rho\cos\omega-\rho')^2+\rho^2\sin^2\omega+e^2]^{\frac{3}{2}}}d\rho\, d\omega.$$

En posant

$$h^2=\rho'^2+e^2,$$
$$g=\frac{2\rho'\rho}{\rho^2+h^2},$$

on peut écrire

$$B=\int_0^\infty\frac{\rho}{(\rho^2+a^2)^{\frac{3}{2}}(\rho^2+h^2)^{\frac{3}{2}}}d\rho\int_0^{2\pi}\frac{d\omega}{(1-g\cos\omega)^{\frac{3}{2}}}.$$

Occupons-nous d'abord de l'intégrale

$$S=\int_0^{2\pi}\frac{d\omega}{(1-g\cos\omega)^{\frac{3}{2}}}.$$

Dans cette expression, g est toujours inférieur à 1, car il est maximum pour $\rho=h$, et la valeur de ce maximum varie de 0 à 1 lorsque ρ' passe de 0 à l'infini.

L'intégrale S se ramène facilement aux intégrales elliptiques, mais il est

$$\mu'_2=\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2\frac{mae}{2\pi}\left[\frac{1}{ah(a+h)^2}+\frac{\rho'^2}{2}\frac{a+4h}{h^3(a+h)^4}+\frac{\rho'^4}{2^3}\frac{3a^3+18a^2h+36ah^2+6h^3}{h^5(a+h)^6}\right.$$
$$\left.+\frac{\rho'^6}{2^5}\frac{10a^5+80a^4h+256a^3h^2+368a^2h^3+128ah^4+16h^5}{h^7(a+h)^8}+\ldots\right].$$

On aura de même, en posant $l^2=e^2+\rho^2$

$$\mu_2=\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2\frac{mbe}{2\pi}\left[\frac{1}{bl(b+l)^2}+\frac{\rho^2}{2}\frac{b+4l}{l^3(b+l)^4}+\ldots\right].$$

plus commode, pour les intégrations suivantes, de la développer en série. La formule du binôme donne

$$\frac{1}{(1-g\cos\omega)^{\frac{3}{2}}}=1-\frac{3}{2}g\cos\omega+\frac{3.5}{2.4}g^2\cos^2\omega+\ldots$$
$$+(-1)^p\frac{3.5\ldots(2p+1)}{2.4\ldots 2p}g^p\cos^p\omega+\ldots$$

Or on a

$$\int_0^{2\pi}d\omega=2\pi\qquad\int_0^{2\pi}\cos^{2p+1}\omega\,d\omega=0$$
$$\int_0^{2\pi}\cos^{2p}\omega\,d\omega=\frac{1.3.5\ldots(2p-1)}{2.4.6\ldots 2p}2\pi.$$

D'où

$$S=2\pi\left[1+\frac{3.5}{2.4}\frac{1}{2}g^2+\frac{3.5.7.9}{2.4.6.8}\frac{1.3}{2.4}g^4+\ldots\right.$$
$$\left.+\frac{3.5\ldots(4n+1)}{2.4\ldots 4n}\frac{1.3\ldots(2n-1)}{2.4\ldots 2n}g^{2n}+\ldots\right].$$

Si l'on désigne par u_n le coefficient de g^{2n} dans cette série, on voit que

$$\frac{u_{n+1}}{u_n}=1-\frac{1}{16n^2}.$$

Les coefficients successifs vont donc en diminuant et leur rapport tend vers 1; le rapport d'un terme au précédent tend donc vers g^2 et la série est convergente.

On a par suite

$$B=2\pi\int_0^{\infty}(1+u_1g^2+u_2g^4+\ldots+u_ng^{2n}+\ldots)\frac{\rho}{(\rho^2+a^2)^{\frac{3}{2}}(\rho^2+h^2)^{\frac{3}{2}}}d\rho$$
$$=2\pi\sum 2^{2n}u_n\rho'^{2n}\int_0^{\infty}\frac{\rho^{2n+1}}{(\rho^2+a^2)^{\frac{3}{2}}(\rho^2+h^2)^{\frac{4n+3}{2}}}d\rho.$$

En désignant par B_n l'intégrale générale qui précède, et posant

$$\rho^2+a^2=(\rho^2+h^2)z^2,$$
$$\lambda=\frac{a}{h},$$

Calcul des densités partielles μ_3 *et* μ'_3. — Les densités partielles d'ordre plus élevé se calculent de même. La formule (3) donne

$$\mu_3 = \frac{k-1}{k+1}\frac{e}{2\pi}\int_0^\infty\int_0^{2\pi}\frac{\mu'_2\rho'}{[(\rho'\cos\omega'-\rho)^2+\rho'^2\sin^2\omega+e^2]^{\frac{3}{2}}}d\rho'\,d\omega'$$
$$= \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^3\frac{mae^2}{2\pi}\sum 2^{2n}u_n\rho^{2n}$$
$$\times\int_0^\infty\left[\frac{1}{ah(a+h)^2}+\frac{\rho'^2}{2}\frac{a+4h}{h^3(a+h)^4}+\ldots\right]\frac{\rho'^{2n+1}\,d\rho'}{(\rho'^2+l^2)^{\frac{4n+3}{2}}}.$$

Prenons seulement le premier terme de cette intégrale

$$C = \sum\frac{2^{2n}u_n\rho^{2n}}{a}\int_0^\infty\frac{\rho'^{2n+1}\,d\rho'}{h(a+h)^2(\rho'^2+l^2)^{\frac{4n+3}{2}}}.$$

En utilisant d'abord la relation

$$\rho'^2 = h^2 - e^2,$$

et posant ensuite

$$h^2+\rho^2 = (h+x)^2,$$

on a

$$B_n = \int_0^\infty\frac{\rho^{2n+1}}{(\rho^2+a^2)^{\frac{3}{2}}(\rho^2+h^2)^{\frac{4n+3}{2}}}d\rho$$
$$= \frac{1}{h^{2n+4}(\lambda^2-1)^{2n+2}}\int_1^\lambda\frac{(\lambda^2-z^2)^n(z^2-1)^{n+1}}{z^2}dz.$$

Il ne reste plus qu'à calculer par cette formule un certain nombre des premiers termes de B. Désignons encore par $F_n(\lambda)$ l'intégrale précédente. On a immédiatement

$$F_0(\lambda) = \frac{(\lambda-1)^2}{\lambda}.$$

D'où

$$B_0 = \frac{1}{ah(a+h)^2}.$$

Pour les termes suivants, le calcul devient long et compliqué. Il est facile de voir, en effet, que $F_n(\lambda)$ doit être divisible par $(\lambda-1)^{2n+2}$, sans quoi B_n serait infini pour les points où l'on a $h=a$. Je développe donc $F_n(\lambda)$

il vient

$$C = \sum \frac{2^{4n+4} u_n \rho^{2n}}{a} \int_{-\infty}^{-(e+l)} \frac{[(\rho^2 - x^2)^2 - 4 e^2 x^2]^n x^{2n+3}}{(x^2 - 2ax - \rho^2)^2 (x^2 + \rho^2)^{4n+2}} dx.$$

Prenons seulement le terme où $n = 0$:

$$C_0 = \frac{16}{a} \int_{-\infty}^{-(e+l)} \frac{x^3}{(x^2 - 2ax - \rho^2)(x^2 + \rho^2)^2} dx.$$

Cette intégrale peut se décomposer en fractions rationnelles, mais il est plus simple d'intégrer par parties, ce qui donne (*) :

$$C_0 = -\frac{l^3 - (a+b) l^2 - (a+b) bl + b (a-e)^2}{abl (l+e) (a^2 + \rho^2)^2} - \frac{3}{(a^2 + \rho^2)^{\frac{5}{2}}} \mathrm{L} \frac{l + b + \sqrt{a^2 + \rho^2}}{l + b - \sqrt{a^2 + \rho^2}}.$$

par rapport aux puissances de $\lambda - 1$ par la série de Taylor. J'ai

$$F_1(\lambda) = \int_1^\lambda \frac{(\lambda^2 - z^2)(z^2 - 1)^2}{z^2} dz = \frac{2}{3.5} (\lambda - 1)^4 (\lambda + 4),$$

$$B_1 = \frac{1}{h^6 (\lambda^2 - 1)^4} F_1(\lambda) = \frac{2}{3.5} \frac{a + 4h}{h^3 (a+h)^4}.$$

La même méthode donne

$$F_2(\lambda) = \int_1^\lambda \frac{(\lambda^2 - z^2)^2 (z^2 - 1)^3}{z^2} dz = \frac{2^3 . (\lambda - 1)^6}{5.7.9} (\lambda^3 + 6\lambda^2 + 12\lambda + 2),$$

$$B_2 = \frac{2^3.3}{3.5.7.9} \frac{a^3 + 6a^2h + 12ah^2 + 2h^3}{h^5 (a+h)^6}.$$

On a de même

$$F_3(\lambda) = \frac{2^4}{5.7} (\lambda - 1)^8 \left[1 + \frac{7}{3}(\lambda - 1) + 2(\lambda - 1)^2 + \frac{2.13}{3.11}(\lambda - 1)^3 + \frac{5}{3.11}(\lambda - 1)^4 + \frac{5}{3.11.13}(\lambda - 1)^5\right].$$

En se bornant à ces quatre premiers termes, on a

$$B = 2\pi \left[\frac{1}{ah(a+h)^2} + \frac{\rho'^2}{2} \frac{a + 4h}{h^3 (a+h)^4} + \frac{\rho'^4}{2^3} \frac{3a^3 + 18a^2h + 36ah^2 + 6h^3}{h^5 (a+h)^6} + \frac{\rho'^6}{2^5} \frac{10a^5 + 80a^4h + 256a^3h^2 + 368a^2h^3 + 128ah^4 + 16h^5}{h^7 (a+h)^8} + \ldots\right].$$

(*) Dans tous les calculs qui suivent, la lettre L représente le logarithme népérien.

En se bornant à ce terme, on a la valeur approchée :

$$\mu_3 = \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^3 \frac{mae^2}{2\pi}\left[-\frac{l^3-(a+b)\,l^2-(a+b)\,b\,l+b\,(a-e)^2}{a\,b\,l\,(l+e)\,(a^2+\rho^2)^2}\right.$$
$$\left.-\frac{3}{(a^2+\rho^2)^{\frac{5}{2}}}\,\mathrm{L}\,\frac{l+b+\sqrt{a^2+\rho^2}}{l+b-\sqrt{a^2+\rho^2}}+\ldots\right].$$

On obtient de même

$$\mu'_3 = \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^3 \frac{mbe^2}{2\pi}\left[-\frac{h^3-(2b+e)\,h^2-(2b+e)(b+e)\,h+a^2(b+e)}{b\,(b+e)\,h\,(h+e)\,(b^2+\rho'^2)^2}\right.$$
$$\left.-\frac{3}{(b^2+\rho'^2)^{\frac{5}{2}}}\,\mathrm{L}\,\frac{h+b+e+\sqrt{b^2+\rho'^2}}{h+b+e-\sqrt{b^2+\rho'^2}}+\ldots\right].$$

Valeur approchée des densités totales μ et μ'. — On peut calculer ainsi autant de termes qu'on veut, mais le calcul va en se compliquant. Je me suis borné seulement aux valeurs approchées de μ_4 et de μ'_4; ces valeurs forment les termes en $\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^4$ des expressions de μ et de μ' qui suivent.

On trouve en effet pour μ et μ', en additionnant les densités partielles que nous avons calculées, les valeurs approchées :

$$\rho = \frac{k-1}{k+1}\frac{ma}{2\pi}\frac{1}{(\rho^2+a^2)^{\frac{3}{2}}} - \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2 \frac{mbe}{2\pi}\left[\frac{1}{bl(b+l)^2} + \frac{\rho^2}{2}\frac{b+4l}{l^3(b+l)^4} + \frac{\rho^4}{2^3}\frac{3b^3+18b^2l+36bl^2+6l^3}{l^5(b+l)^6}\right.$$

$$\left. + \frac{\rho^6}{2^5}\frac{10b^5+80b^4l+256b^3l^2+368b^2l^3+128bl^4+16l^5}{l^7(b+l)^8} + \ldots\right]$$

$$+\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^3 \frac{mae^2}{2\pi}\left[-\frac{l^3-(2a+e)l^2-(2a+e)bl+b(a-e)^2}{abl(l+e)(a^2+\rho^2)^2} - \frac{3}{(a^2+\rho^2)^{\frac{5}{2}}} \mathrm{L}\frac{l+b+\sqrt{a^2+\rho^2}}{l+b-\sqrt{a^2+\rho^2}} + \ldots\right]$$

$$-\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^4 \frac{mbe^3}{2\pi}\left\{\frac{l^2+2(b+e)l+b(2b+3e)}{b(b+e)l(l+e)(l^2-b^2)^2} + \frac{(3b-2e)(b^2-le)}{2b^3(b^2-e^2)(l^2-b^2)^2} + \frac{l}{b^3(l^2-b^2)^2}\right.$$

$$+ \frac{bl^2-10b^3+6b^2e+9be^2-6e^3}{4b(b^2-e^2)^{\frac{3}{2}}(b^2-l^2)^{\frac{5}{2}}}\left[\mathrm{L}\frac{le-b^2+\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}{le-b^2-\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}\right.$$

$$\left. - \mathrm{L}\frac{l^2+e^2-2b^2+2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}{l^2+e^2-2b^2-2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}\right]$$

$$+ \frac{1}{b(b^2-e^2)^{\frac{1}{2}}(b^2-l^2)^{\frac{5}{2}}}\left[\frac{4l^2-2b^2-2e^2+2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}{\sqrt{2b^2-e^2-l^2+2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}}\right.$$

$$\left. + \frac{4\rho^4-15(b^2-e^2)\rho^2+12(l^2-e^2)^2-3[3\rho^2-4(b^2-e^2)]\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}{[2b^2-e^2-l^2+2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

$$\times \operatorname{arc\,tg}\frac{h-e}{\sqrt{2b^2-e^2-l^2+2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}}$$

$$\frac{1}{b(b^2-e^2)^{\frac{1}{2}}(b^2-l^2)^{\frac{5}{2}}}\left[\frac{4l^2-2b^2-2e^2-2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}{\sqrt{2b^2-e^2-l^2-2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}}\right.$$

$$\left. + \frac{4\rho^4-15(b^2-e^2)\rho^2+12(b^2-e^2)^2+3[3\rho^2-4(b^2-e^2)]\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}}{[2b^2-e^2-l^2-2\sqrt{(b^2-e^2)(b^2-l^2)}]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

$$\times \operatorname{arc\,tg}\frac{h-e}{\ldots} + \ldots \Big)$$

$$\mu' = \frac{k-1}{k+1}\,\frac{mb}{2\pi}\,\frac{1}{(\rho'^2+b^2)^{\frac{3}{2}}} - \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2 \frac{mae}{2\pi}\Bigg[\frac{1}{ah(a+h)^2} + \frac{\rho'^2}{2}\,\frac{a+4h}{h^3(a+h)^4} + \frac{\rho'^4}{2^3}\,\frac{3a^3+18a^2h+36ah^2+6h^3}{h^5(a+h)^6}$$

$$+\frac{\rho'^6}{2^5}\,\frac{10a^5+80a^4h+256a^3h^2+368a^2h^3+128ah^4+16h^5}{h^7(a+h)^8}+\ldots\Bigg]$$

$$+\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^3\frac{mbe^2}{2\pi}\left[-\frac{h^3-(2b+e)h^2-(2b+e)(b+e)h+a^2(b+e)}{b(b+e)h(h+e)(b^2+\rho'^2)^2}-\frac{3}{(b^2+\rho'^2)^{\frac{5}{2}}}\,\mathrm{L}\,\frac{h+b+e+\sqrt{b^2+\rho'^2}}{h+b+e-\sqrt{b^2+\rho'^2}}+\ldots\right]$$

$$-\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^4\frac{mae^3}{2\pi}\Bigg\{\frac{h^2+2bh+a(2b+e)}{abh(h+e)(h^2-a^2)^2}+\frac{(3a-2e)(a^2-he)}{2a^3(a^2-e^2)(a^2-h^2)^2}+\frac{h}{a^3(a^2-h^2)^2}$$

$$+\frac{ah^2-10a^3+6a^2e+9ae^2-6e^3}{4a(a^2-e^2)^{\frac{3}{2}}(a^2-h^2)^{\frac{5}{2}}}\Bigg[\mathrm{L}\,\frac{he-a^2+\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}{he-a^2-\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}$$

$$-\mathrm{L}\,\frac{h^2+e^2-2a^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}{h^2+e^2-2a^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}\Bigg]$$

$$+\frac{1}{a(a^2-e^2)^{\frac{1}{2}}(a^2-h^2)^{\frac{5}{2}}}\Bigg[\frac{4h^2-2a^2-2e^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}{\sqrt{2a^2-e^2-h^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}}$$

$$+\frac{4\rho'^4-15(a^2-e^2)\rho'^2+12(a^2-e^2)^2-3[3\rho'^2-4(a^2-e^2)]\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}{[2a^2-e^2-h^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}]^{\frac{3}{2}}}\Bigg]$$

$$\times\ \mathrm{arc\,tg}\,\frac{h-e}{\sqrt{2a^2-e^2-h^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}}$$

$$-\frac{1}{a(a^2-e^2)^{\frac{1}{2}}(a^2-h^2)^{\frac{5}{2}}}\Bigg[\frac{4h^2-2a^2-2e^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}{\sqrt{2a^2-e^2-h^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}}$$

$$+\frac{4\rho'^4-15(a^2-e^2)\rho'^2+12(a^2-e^2)^2+3[3\rho'^2-4(a^2-e^2)]\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}{[2a^2-e^2-h^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}]^{\frac{3}{2}}}\Bigg]$$

$$\times\ \mathrm{arc\,tg}\,\frac{h-e}{\sqrt{2a^2-e^2-h^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-h^2)}}}+\ldots\Bigg\}$$

$$+\ldots\ldots$$

Valeur approchée du potentiel. — Nous avons vu plus haut que, dans l'expression (4) du potentiel en P, le terme dû aux densités partielles μ_1 et μ'_1 est nul. Nous calculerons seulement le terme suivant, dû aux densités partielles μ_2 et μ'_2.

Ces deux densités donnent, dans la valeur cherchée, une série de termes en $\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2$, dont le premier est

$$+\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2 \frac{me}{2\pi}\left[\int_0^\infty \frac{\rho}{l(b+l)^2\sqrt{\rho^2+p^2}}\,d\rho - \int_0^\infty \frac{\rho'}{h(a+h)^2\sqrt{\rho'^2+r^2}}\,d\rho'\right].$$

Par des transformations convenables (*), on obtient :

(*) Comme on a

$$l^2 = e^2 + \rho^2,$$

la première intégrale devient, en posant $q^2 = p^2 - e^2$,

$$R = \int_e^\infty \frac{1}{(b+l)^2\sqrt{l^2+q^2}}\,dl;$$

puis, en posant encore

$$l^2 + q^2 = (l+x)^2, \quad x - b = y, \quad b^2 + q^2 = \alpha^2,$$

on obtient

$$R = \int_{-\infty}^{-(p+e)} \frac{4x}{(x^2-2bx-q^2)^2}\,dx = 4\int_{-\infty}^{-(p+b+e)} \frac{(y+b)}{(y^2-\alpha^2)^2}\,dy,$$

qu'on peut décomposer facilement en

$$R = \frac{(b-r)}{(b+e)(b^2+p^2-e^2)} - \frac{b}{(b^2+p^2-e^2)^{\frac{3}{2}}}\,\mathrm{L}\frac{p+b+e+\sqrt{p^2+b^2-e^2}}{p+b+e-\sqrt{p^2+b^2-e^2}}.$$

Un calcul analogue donne pour le second terme de la parenthèse

$$\frac{(b-r)}{b(a^2+r^2-e^2)} - \frac{a}{(a^2+r^2-e^2)^{\frac{3}{2}}}\,\mathrm{L}\frac{r+b+\sqrt{r^2+a^2-e^2}}{r+b-\sqrt{r^2+a^2-e^2}}.$$

$$+\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2 \frac{me}{2\pi}\left\{\frac{e(r-b)[r^2+2(b+e)r+3b^2]}{b(b+e)(r^2+a^2-e^2)(p^2+b^2-e^2)}\right.$$
$$+\frac{a}{(r^2+a^2-e^2)^{\frac{3}{2}}}\,\mathrm{L}\,\frac{r+b+\sqrt{r^2+a^2-e^2}}{r+b-\sqrt{r^2+a^2-e^2}}$$
$$\left.-\frac{b}{(p^2+b^2-e^2)^{\frac{3}{2}}}\,\mathrm{L}\,\frac{p+b+e+\sqrt{p^2+b^2-e^2}}{p+b+e-\sqrt{p^2+b^2-e^2}}+\ldots\right\}.$$

On pourrait calculer de même les termes suivants, mais j'ai cru pouvoir m'arrêter à l'expression approchée du potentiel ainsi obtenue :

$$\mathrm{V}=\frac{m}{\mathrm{D}}+\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2 \frac{me}{2\pi}$$
$$\times\left\{\frac{e(r-b)[r^2+2(b+e)r+3b^2]}{b(b+e)(r^2+a^2-e^2)(p^2+b^2-e^2)}\right.$$
$$+\frac{a}{(r^2+a^2-e^2)^{\frac{3}{2}}}\,\mathrm{L}\,\frac{r+b+\sqrt{r^2+a^2-e^2}}{r+b-\sqrt{r^2+a^2-e^2}}$$
$$\left.-\frac{b}{(p^2+b^2-e^2)^{\frac{3}{2}}}\,\mathrm{L}\,\frac{p+b+e+\sqrt{p^2+b^2-e^2}}{p+b+e-\sqrt{p^2+b^2-e^2}}+\ldots\right\}+\ldots$$

Calcul de l'intensité du champ. — J'ai examiné aussi l'intensité du champ au point P, séparé du point électrisé A par le diélectrique. Le calcul de cette force est semblable à celui de V ; il contient des intégrales identiques ou analogues ; je n'y insisterai donc pas et je me contenterai d'indiquer sommairement les résultats. La valeur de cette force est évidemment

$$\mathrm{F}=\frac{m}{\mathrm{D}^2}-2\pi p\int_0^\infty \frac{\mu\rho}{(\rho^2+p^2)^{\frac{3}{2}}}\,d\rho+2\pi r\int_0^\infty \frac{\mu'\rho'}{(\rho'^2+r^2)^{\frac{3}{2}}}\,d\rho'.$$

Le terme en $\dfrac{k-1}{k+1}$ s'annule encore ici, et l'on trouve :

$$
\begin{aligned}
F = \frac{m}{D^2} + \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2 me \Bigg[& \frac{r^3-(2a+e)r^2-(2a+e)br+b(a-e)^2}{bp(r^2+a^2-e^2)^2} - \frac{p^3-(2b+e)p^2-(2b+e)(b+e)p+a^2(b+e)}{(b+e)(p+e)(p^2+b^2-e^2)^2} \\
& + \frac{3a}{(r^2+a^2-e^2)^{\frac{5}{2}}} \mathrm{L} \frac{r+b+\sqrt{r^2+a^2-e^2}}{r+b-\sqrt{r^2+a^2-e^2}} - \frac{3b}{(b^2+p^2-e^2)^{\frac{5}{2}}} \mathrm{L} \frac{p+b+e+\sqrt{p^2+b^2-e^2}}{p+b+e-\sqrt{p^2+b^2-e^2}} + \ldots \Bigg] \\
-\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^3 \frac{mape^2}{16} \Bigg\{ & \frac{p^2+2bp+a(2b+e)}{abp(p+e)(p^2-a^2)^2} + \frac{(3a-2e)(a^2-pe)}{2a^3(a^2-e^2)(p^2-a^2)^2} + \frac{p}{a^3(p^2-a^2)^2} \\
& + \frac{ap^2-10a^3+6a^2e+9ae^2-6e^3}{4a(a^2-e^2)^{\frac{3}{2}}(a^2-p^2)^{\frac{5}{2}}} \Bigg[\mathrm{L} \frac{pe-a^2+\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}{pe-a^2-\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}} \\
& \qquad - \mathrm{L} \frac{p^2+e^2-2a^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}{p^2+e^2-2a^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}} \Bigg] \\
& + \frac{1}{a(a^2-e^2)^{\frac{1}{2}}(a^2-p^2)^{\frac{5}{2}}} \Bigg[\frac{4p^2-2a^2-2e^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}{\sqrt{2a^2-e^2-p^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}} \\
& \qquad + \frac{4(p^2-e^2)^2-15(a^2-e^2)(p^2-e^2)+12(a^2-e^2)^2-3(3p^2+e^2-4a^2)\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}{2a^2-e^2-p^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}} \Bigg] \\
& \qquad \times \operatorname{arc\,tg} \frac{r}{\sqrt{2a^2-e^2-p^2+2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}} \\
& - \frac{1}{a(a^2-e^2)^{\frac{1}{2}}(a^2-p^2)^{\frac{5}{2}}} \Bigg[\frac{4p^2-2a^2-2e^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}{\sqrt{2a^2-e^2-p^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}} \\
& \qquad + \frac{4(p^2-e^2)^2-15(a^2-e^2)(p^2-e^2)+12(a^2-e^2)^2+3(3p^2+e^2-4a^2)\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}{\left[2a^2-e^2-p^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}\right]^{\frac{3}{2}}} \Bigg] \\
& \qquad \times \operatorname{arc\,tg} \frac{r}{\sqrt{2a^2-e^2-p^2-2\sqrt{(a^2-e^2)(a^2-p^2)}}} + \ldots \Bigg\}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&+\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^{3}\frac{mbre^{2}}{16}\left\{\frac{r^{2}+2(b+e)r+b(2a+5e)}{b(b+e)rp(r^{2}-a^{2})^{2}}+\frac{(3b-2e)(b^{2}-re)}{2b^{3}(b^{2}-e^{2})(r^{2}-b^{2})^{2}}+\frac{r}{b^{3}(r^{2}-b^{2})^{2}}\right.\\
&\quad+\frac{br^{2}-10b^{3}+6b^{2}e+9be^{2}-6e^{3}}{4b(b^{2}-e^{2})^{\frac{3}{2}}(b^{2}-r^{2})^{\frac{5}{2}}}\left[\mathrm{L}\frac{re-b^{2}+\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}{re-b^{2}-\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}\right.\\
&\qquad\left.-\mathrm{L}\frac{r^{2}+e^{2}-2b^{2}+2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}{r^{2}+e^{2}-2b^{2}-2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}\right]\\
&\quad+\frac{1}{b(b^{2}-e^{2})^{\frac{1}{2}}(b^{2}-r^{2})^{\frac{5}{2}}}\left[\frac{4r^{2}-2b^{2}-2e^{2}+2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}{\sqrt{2b^{2}-e^{2}-r^{2}+2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}}\right.\\
&\qquad\left.+\frac{4(r^{2}-e^{2})^{2}-15(b^{2}-e^{2})(r^{2}-e^{2})+12(b^{2}-e^{2})^{2}-3(3r^{2}+e^{2}-4b^{2})\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}{\left[2b^{2}-e^{2}-r^{2}+2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}\right]^{\frac{3}{2}}}\right]\\
&\qquad\times\operatorname{arc\,tg}\frac{r-e}{\sqrt{2b^{2}-e^{2}-r^{2}+2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}}\\
&\quad-\frac{1}{b(b^{2}-e^{2})^{\frac{1}{2}}(b^{2}-r^{2})^{\frac{5}{2}}}\left[\frac{4r^{2}-2b^{2}-2e^{2}-2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}{\sqrt{2b^{2}-e^{2}-r^{2}-2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}}\right.\\
&\qquad\left.\times\frac{4(r^{2}-e^{2})^{2}-15(b^{2}-e^{2})(r^{2}-e^{2})+12(b^{2}-e^{2})^{2}+3(3r^{2}+e^{2}-4b^{2})\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}{\left[2b^{2}-e^{2}-r^{2}-2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}\right]^{\frac{3}{2}}}\right]\\
&\qquad\left.\times\operatorname{arc\,tg}\frac{r-e}{\sqrt{2b^{2}-e^{2}-r^{2}-2\sqrt{(b^{2}-e^{2})(b^{2}-r^{2})}}}+\dots\right\}\\
&+\ldots\ldots
\end{aligned}
$$

On voit que, même en se bornant à un petit nombre de termes, l'expression du champ est assez compliquée. Le trait le plus caractéristique, c'est que les expressions du champ et du potentiel peuvent être développées en séries dont les termes contiennent les puissances croissantes de $\frac{k-1}{k+1}$, et que le premier de ces termes, qui doit être le plus important, est nul dans les deux cas. Je ferai connaitre maintenant les expériences par lesquelles j'ai essayé de vérifier ces formules.

(*A suivre.*)

Julien LEFÈVRE,

Docteur ès sciences physiques,
Professeur au lycée et à l'école
des sciences de Nantes.

NOTE SUR LA GUTTA-PERCHA

J'ai pu me procurer dernièrement un échantillon de fil de cuivre recouvert de gutta-percha extraite des feuilles de l'isonandra par le procédé de M. Serullas. Son isolement, paraît-il, est très grand, mais je n'ai pu le mesurer, sa longueur n'étant que de 1 mètre, j'ai dû me borner à l'analyse de cette gutta-percha, opération qui a donné les résultats suivants :

Eau.	néant.
Impuretés.	0,80 p. 100
Résine.	16,00
Gutta pure.	83,20
	100,00

En séparant les deux résines l'une de l'autre, on trouve les quantités ci-après :

Fluaville.	1,72 p. 100
Albane.	14,28
	16,00

La grande quantité d'albane par rapport au peu de fluaville et surtout l'absence d'eau suffisent pour expliquer le grand pouvoir isolant qu'on attribue à ce diélectrique, malgré la quantité considérable de gutta pure. Je suis, d'ailleurs, porté à croire que, par suite du manque d'eau, cette gutta-percha s'oxydera moins facilement que celles dont on a fait usage jusqu'ici, et par suite qu'elle se conservera mieux.

Les moyens que j'avais à ma disposition pour étu-

dier la gutta-percha allant me manquer, je suis obligé, à mon grand regret, d'abandonner l'étude de cette substance, ainsi que celle de bien des questions touchant à la télégraphie.

Toutefois, ce que j'ai publié à son sujet me paraît suffisant pour établir quels sont les effets de l'eau et des résines sur la gutta-percha. L'eau diminue son pouvoir isolant et facilite son oxydation; les résines, surtout l'albane, augmentent ce même pouvoir, mais, en même temps, sont une cause de détérioration, et deux câbles sous-marins ou souterrains fabriqués avec des guttas très différentes peuvent, à un moment donné, isoler également; mais celui dont la gutta contient moins d'eau et de résines se conservera plus longtemps en bon état. L'analyse s'impose donc comme seul moyen de reconnaître si la gutta d'un câble est de bonne ou de mauvaise qualité, et c'est pour ne l'avoir pas effectuée qu'il y a quelques années (avant que j'aie commencé mes recherches), on a accepté des câbles souterrains et des âmes de câbles sous-marins de mauvaise qualité, quoique remplissant les conditions électriques spécifiées dans les cahiers des charges. Les âmes des câbles sous-marins se sont tellement détériorées après quelques mois de séjour dans l'eau, qu'elles n'ont pu être utilisées; quant aux câbles souterrains, les isolements de plusieurs bobines ont diminué notablement avant leur emploi, quelques-unes même n'ont pu servir. Il est aussi arrivé quelquefois, lors de l'établissement des lignes souterraines interurbaines, au moment de la soudure des câbles bout à bout, par un temps un peu froid, que dans quelques-uns la gutta-percha se fendillait. Ce phénomène devait avoir pour cause la grande quantité d'albane que con-

tenait cette gutta, et non le motif que j'ai indiqué à l'époque où j'ai été consulté à ce sujet.

Pour terminer l'étude de la gutta-percha au point de vue où je me suis placé, il serait utile de résoudre la question suivante : les guttas pures provenant d'origines différentes ont-elles des qualités électriques identiques?

Il paraîtrait naturel, afin d'arriver à la solution, de recouvrir avec ces guttas pures, des fils de cuivre de même diamètre ; en donnant à chacune des âmes ainsi formées, la même épaisseur de diélectrique, on mesurerait ensuite l'isolement et la capacité électrique de ces âmes. Mais, pour confectionner ces âmes, il faudrait porter les guttas à une température assez élevée, à laquelle elles pourraient s'oxyder.

Aussi me paraît-il préférable de réduire ces guttas en feuilles très minces ayant toutes même épaisseur et avec lesquelles on ferait des condensateurs qui remplaceraient les âmes.

C'est ce moyen que j'ai employé, il y a quelque temps, en opérant sur deux guttas pures provenant l'une d'une gutta-percha très bonne, l'autre d'une gutta-percha très mauvaise; je n'ai pu arriver à un résultat à cause des petites quantités de guttas mises à ma disposition. L'opération est à recommencer.

Les expériences nombreuses que j'ai faites, et dont quelques-unes seulement sont relatées dans les *Annales*, ont porté sur des guttas de toutes provenances et travaillées dans sept usines différentes ; les résultats ont toujours été semblables, ce qui me fait penser que les guttas pures qu'elles contenaient avaient les mêmes qualités électriques, mais je ne pourrais l'affirmer.

Il en serait d'ailleurs autrement, que cela n'infirmerait en rien aucune de mes conclusions sur les influences de l'eau et des résines et sur la nécessité de déterminer les quantités de ces substances qui entrent dans la gutta-percha d'un câble ; cette analyse serait même plus nécessaire, parce qu'alors les mesures électriques renseigneraient encore moins bien sur la valeur de la gutta-percha employée que s'il était établi que toutes les guttas pures ont les mêmes qualités.

Je crois devoir rappeler, en terminant, que je considère comme gutta-percha assez bonne celle qui a au moins 55 p. 100 de gutta pure, au maximum 5 p. 100 d'eau et 1 p. 100 de matières étrangères, et dans laquelle il n'y a pas plus d'albane que de fluaville. La gutta-percha bonne est celle qui contient au moins 60 p. 100 de gutta pure, au plus 5 p. 100 d'eau et 0,8 p. 100 de matières étrangères, la quantité d'albane ne dépassant pas, d'ailleurs, celle de la fluaville. Enfin, la gutta-percha de très bonne qualité doit contenir au moins 65 p. 100 de gutta pure, pas plus de 3 p. 100 d'eau, 0,5 p. 100 de matières étrangères et 12 p. 100 d'albane.

LAGARDE.

SUR L'ACTINOMÉTRIE ÉLECTRO-CHIMIQUE

ET DIVERSES APPLICATIONS TÉLÉGRAPHIQUES

On désigne par le terme général de *radiation*, l'énergie émise par une source quelconque, capable de produire à distance, c'est-à-dire sans intermédiaire visible des phénomènes calorifiques, lumineux, etc.

Tout appareil disposé de façon à comparer l'intensité des radiations émises par des sources données se nomme actinomètre.

Dès 1839, E. Becquerel signalait l'action d'un faisceau solaire sur les lames métalliques plongées dans diverses solutions et, concentrant ses recherches sur les composés haloïdes d'argent, créait son actinomètre électro-chimique au sous-chlorure d'argent.

Cette découverte a donné lieu à de nombreux travaux dus à Grove, Hankel, Egoroff, Pellat, Grivaux.

Il y a quelques années, MM. Gouy et Rigollot reconnurent qu'une lame de cuivre oxydée et plongée dans une dissolution de chlorure, de bromure ou d'iodure métallique devient très sensible aux rayons lumineux, même de faible intensité, et pouvait être employée comme *actinomètre*.

Tout récemment, MM. Rigollot et Maréchal mirent leurs travaux en commun pour rechercher et expérimenter les diverses applications pratiques qui semblaient pouvoir être tentées dans cette voie. Les

recherches furent faites parallèlement par M. Rigollot, au laboratoire de physique de la faculté des sciences de Lyon et par M. Maréchal, au laboratoire des recherches physiques de la Sorbonne (*).

Cette collaboration aboutit à des résultats dont une partie fait l'objet du présent mémoire.

Théoriquement, l'actinomètre proprement dit se compose de deux lames de cuivre : l'une, oxydée, est exposée aux radiations lumineuses ; l'autre, non oxydée, est protégée de l'action de la lumière, soit en l'entourant de parchemin ou de papier, soit en la plaçant immédiatement derrière la première lame, à 1 millimètre de distance environ.

Pratiquement, les lames oxydées se préparent en chauffant sur un bec Bunsen les lames de cuivre, bien nettoyées au papier d'émeri, jusqu'à ce que les irrisations qui se produisent soient remplacées par une teinte uniforme : on a ainsi une couche très adhérente rouge orangé sous l'incidence normale ; en poussant plus loin l'oxydation, la couche noircit, la sensibilité diminue peu à peu, et, de plus, cette couche d'oxyde s'enlève facilement par écailles.

Pour éviter l'action nuisible de l'oxyde de carbone, on place la lame de cuivre à oxyder sur une plaque de cuivre plus large et chauffée directement au Bunsen. Si la lame a partout la même épaisseur, les couleurs se succèdent régulièrement, comme dans les anneaux colorés vus par transmission, et, plus ou moins rapidement

(*) Non seulement M. le professeur Lippmann a mis à ma disposition les ressources du laboratoire des Recherches physiques, mais encore le savant membre de l'Institut a bien voulu m'honorer de ses conseils. Je suis heureux de pouvoir lui donner ici un faible témoignage de ma profonde gratitude. C. M.

en activant ou en modérant la flamme du brûleur. A l'apparition du deuxième violet, vu sous l'incidence de 45°, la lame est placée sur un bloc métallique; elle se refroidit, l'oxydation cesse. On recouvre d'une substance isolante (paraffine, gomme-laque, etc.), la face non éclairée de la lame exposée à la lumière. Cette dernière forme le pôle positif de l'élément.

L'effet produit par la lumière est instantané; il cesse dès qu'on supprime l'éclairement.

A circuit ouvert, la lumière diffuse du jour produit une force électromotrice de plusieurs millièmes de volt, les rayons solaires un peu moins d'un dixième.

La force électromotrice est un peu plus grande quand l'élément est fermé sur un circuit de quelques centaines d'ohms.

Les expériences se font très bien avec un galvanomètre à cadre mobile; avec un galvanomètre Thomson, la sensibilité est telle que l'on peut mettre en évidence l'effet produit par la lumière d'une bougie éloignée de plusieurs mètres.

Dans les expériences relatées plus loin, le liquide employé est de l'eau contenant 1 millième de chlorure, bromure ou iodure de sodium.

Au laboratoire, comme expérience démonstrative, on fera l'étude de la force électromotrice dans les diverses radiations lumineuses de la manière suivante:

Prendre une lame circulaire de cuivre électrolytique (*) ayant partout la même épaisseur, bien plane et mince autant que possible, d'un diamètre de 5 centimètres. On chauffe directement au milieu avec le cha-

(*) En général, pour obtenir une oxydation régulière et aussi pour éviter les actions secondaires qui troubleraient l'élément, il est utile d'employer exclusivement le cuivre électrolytique étiré et recuit.

lumeau dit *lampe d'émailleur* et on obtient des anneaux colorés (principe des photographies colorées de M. le professeur Lippmann) très réguliers, se succédant avec les couleurs de l'arc-en-ciel, l'épaisseur de la couche d'oxyde croissant des anneaux violets aux anneaux rouges.

Comme source on prend, à défaut de lumière Drummond, une lampe à gaz, placée dans la lanterne à projections munie d'un obturateur à trous. On projette avec une lentille de $0^m,20$ de foyer l'image nette du trou, successivement sur les divers anneaux. On emploie un galvanomètre de la plus grande sensibilité. L'élongation de l'aiguille lumineuse du galvanomètre montrera que pour un actinomètre donné, monté avec une certaine dissolution, la force électromotrice varie avec la couleur.

L'étude de la force électromotrice dans les diverses radiations lumineuses a été faite sur un spectre obtenu au moyen d'un réseau métallique concave de Rowland de 3 pieds de longueur focale; on employait un galvanomètre de Thomson de 12.000^{ω} de résistance; on lisait sur une échelle transparente l'arc d'impulsion obtenu en laissant tomber successivement sur l'actinomètre les différents rayons du spectre.

Les courbes suivantes ont été obtenues, en portant en abscisses les longueurs d'ondes et en ordonnées les divisions lues sur l'échelle transparente du galvanomètre; elles se rapportent aux chlorure, bromure et iodure de sodium.

Eau et chlorure de sodium. — La sensibilité de l'actinomètre croît lentement, d'une manière à peu près régulière depuis les rayons rouges ($\lambda = 0^{\mu},700$), passe par un maximum pour les rayons verts-bleus ($\lambda = 0^{\mu},500$),

puis diminue rapidement pour les radiations violettes ($\lambda = 0^{\mu},400$), l'appareil étant insensible aux longueurs d'ondes plus petites (*fig.* 1).

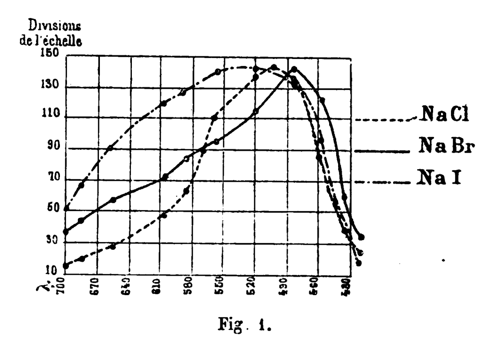


Fig. 1.

Eau et bromure de sodium. — La sensibilité par rapport aux différents rayons lumineux est à peu près la même que dans le cas précédent, et un maximum très net existe pour les rayons de longueur d'onde ($0^{\mu},485$).

Eau et iodure de sodium. — En employant l'iodure de sodium, l'actinomètre est beaucoup plus affecté par les rayons de faible réfrangibilité qu'en employant les dissolutions précédentes : il est déjà très sensible pour les rayons jaunes et sa sensibilité se maintient jusqu'aux rayons de longueur d'onde ($0^{\mu},480$) puis décroît rapidement.

Si, pour chaque dissolution, après avoir parcouru le spectre du rouge au violet, on expose à nouveau le système des lames dans toutes les parties du spectre, mais en revenant du violet au rouge, les courbes conservent la même forme et l'accroissement de sensibilité pour les rayons rouges signalé par M. E. Becquerel pour les lames iodurées, quand ces lames on été préalablement exposées aux rayons plus réfrangibles, ne semble pas avoir lieu dans les expériences précédentes.

INFLUENCE DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE SUR L'INTENSITÉ DU COURANT.

On a recherché si, comme l'indique Egoroff pour les plaques iodurées, l'intensité du courant est inversement proportionnelle au carré de la distance de la source radiante à la surface radiée.

En faisant usage de la lumière Drummond, on a observé que, conformément aux indications d'Egoroff, la force électromotrice de l'actinomètre varie en raison inverse du carré de la distance de la source lumineuse à la lame de cuivre éclairée, pourvu que la lumière qui agit sur l'actinomètre ait une faible intensité.

On peut donc admettre que, dans les circonstances de l'expérience, l'intensité du courant est proportionnelle à l'intensité lumineuse, mais seulement dans les circonstances de l'expérience, c'est-à-dire en lumière faible ; car si, au moyen d'un héliostat, on envoie la lumière solaire sur l'appareil en interposant sur le trajet deux nicols montés sur des cercles gradués afin de pouvoir mesurer l'angle de leurs sections principales, et que l'on fasse varier cet angle de 0 à 90°, l'éclairement de la lame variant de 1 à 0, la loi ne se vérifie plus et l'intensité lumineuse croît plus vite que l'intensité du courant.

On augmente beaucoup la force électromotrice développée par la lumière en recouvrant la lame oxydée de différentes matières colorantes telles que éosine, *érythrosine*, *safranine*, *azuline*, *ponceau*, *vert cristaux*, *vert malachite*, *bleu soluble*, *violet de formyle*, etc.

La sensibilité de la lame s'obtient en la plongeant dans la solution colorante au 1/1000e environ; on l'immerge ensuite dans l'eau distillée pour enlever l'excès de colorant, puis on s'en sert immédiatement comme lame positive de l'élément.

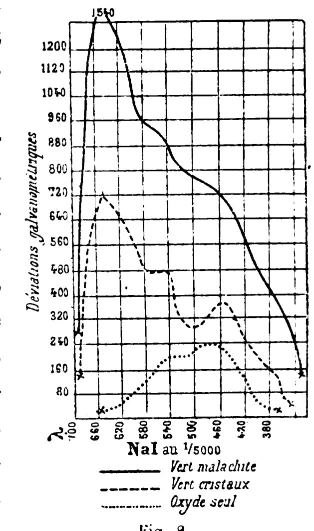


Fig. 2.

On peut aussi, après avoir coloré et lavé la lame, la laisser sécher à l'air; elle conserve toute sa sensibilité lorsqu'on la plonge ensuite dans la solution diluée d'iodure de sodium, par exemple. Les lames ainsi préparées retiennent bien peu de matières colorantes, car elles ne paraissent légèrement teintées que sous une grande incidence, mais l'adhérence est très grande; on peut, en effet, les frotter sous l'eau avec du papier filtre et elles conservent encore une partie de la sensibilité acquise.

On obtient également de bons résultats en trempant les lames, après oxydation, dans une *solution douce de gélatine blanche très diluée.* Après séchage, on paraffine le côté non éclairé. Les lames ainsi préparées peuvent se conserver très longtemps sans rien perdre de leur sensibilité. Toutefois, il faut remarquer qu'une lame gélatinée ne donne pas, de suite, le maximum d'intensité; il est nécessaire de la laisser s'humidifier dans la solution NaI une heure environ, puis on la plonge dans le bain colorant avant de s'en servir.

L'augmentation de la force électromotrice par la

lumière blanche dépend de la substance colorante employée.

M. Rigollot a étudié dans le spectre l'effet des rayons de longueur d'onde déterminée, successivement sur une lame de cuivre oxydée, puis sur la même lame plongée dans une solution colorante donnée, afin de rechercher la relation entre la matière colorante expérimentée et la longueur d'onde des rayons qui, plus particulièrement, exaltaient la force électromotrice.

Le spectre était obtenu au moyen d'un réseau métallique concave de Rowland, de 3 pieds de longueur focale. On comparait les intensités des courants au moyen d'un galvanomètre Thomson à grande résistance. Les lames oxydées, de $0^{cm},3$ de large sur 1 centimètre de long, étaient plongées dans une solution d'iodure de sodium au $1/100^{e}$ renfermée dans un petit tube en ébonite; une ouverture latérale fermée par un verre mince permettait à la lumière d'agir. L'actinomètre pouvait occuper successivement toutes les régions du premier spectre du réseau qui se projetait sur une longueur d'environ 40 centimètres.

Voici les résultats d'une expérience dans laquelle la sensibilisation de la lame de cuivre a été obtenue au moyen du vert cristaux. Les nombres inscrits donnent les déviations lues sur l'échelle du galvanomètre pour la même lame de cuivre oxydée, avant et après la sensibilisation :

	$\lambda = 0^{\mu},681$	650	600	550	500	450	410
Lame non sensibilisée	$16^{div.}$	18	80	190	208	200	88
Même lame sensibilisée	140	760	600	408	380	288	168

Dans ce cas, la sensibilité est devenue très grande pour les rayons rouges.

Avec le vert malachite, la sensibilité, comparée à

celle de la lame non sensibilisée, est encore bien plus considérable que la sensibilisation par le vert cristaux; elle est environ huit fois plus grande et le maximum d'intensité électrique se trouve porté près de l'infra rouge.

Si, d'autre part, on note la position, dans le spectre, de la bande d'absorption de la solution colorante employée, on constate que les radiations qui sont plus particulièrement actives pour la lame de cuivre oxydée, sensibilisée par une matière colorante donnée, dépendent de la position de la bande d'absorption de cette matière colorante.

Ces faits sont à rapprocher de la sensibilisation des plaques photographiques pour tel ou tel rayon quand on les plonge dans des solutions diluées appropriées.

PHÉNOMÈNES ACTINIQUES. — RÉACTIONS.

Dans l'état actuel de la science, il est bien difficile d'expliquer les phénomènes actiniques. Nous n'indiquons ici que le résultat de nos expériences, en y ajoutant toutefois les constatations que nous avons pu faire dans le cours de nos modestes travaux.

Comme tout élément a un seul liquide, l'actinomètre se polarise très vite. En étudiant la force électromotrice développée par la lumière d'une lampe photométrique brûlant 42 grammes d'huile à l'heure, on constate que la sensibilité de l'élément actinique, maintenu fermé dans l'obscurité sur une résistance de 200^{ω} environ, décroît assez rapidement au début, puis devient sensiblement constante.

Au moment où on plonge les lames de cuivre dans la solution NaI, il se produit donc une force électro-

motrice initiale qui décroît au bout de quelques minutes : l'actino se polarise. Il subsiste cependant une force électromotrice permanente faible, résultant de la dépolarisation partielle provoquée par l'oxyde de la lame éclairée. On dit alors que l'actino a atteint son équilibre de polarisation.

Si on prend deux lames de Cu, oxydées toutes deux aussi identiquement que possible, d'abord non paraffinées, ensuite paraffinées, on obtient à peine quelques divisions de l'échelle du Thomson, tantôt à droite, tantôt à gauche, résultant de la force électromotrice permanente. On éclaire tantôt la lame de droite, tantôt la lame de gauche et quel que soit le sens de la déviation permanente, que la lame éclairée soit + ou soit — par rapport à l'autre, l'éclairement rend la lame sur laquelle tombent les rayons lumineux positive par rapport à l'autre, c'est-à-dire que le sens du courant à l'extérieur de l'actino est toujours de la lame éclairée à la lame placée dans l'obscurité, même lorsque avant l'éclairement il est de sens inverse.

Si on met ensuite l'actino en communication avec un élément Daniell, comme l'indique le schéma (*fig.* 3 et 4), successivement pendant des temps variant de 15 secondes à 2 minutes, et qu'après chaque polarisation on essaie l'effet lumineux, on constate :

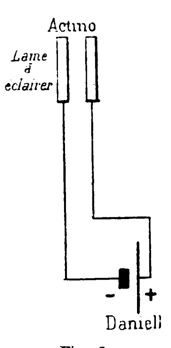


Fig. 3.

1° Que la force électromotrice permanente devient de plus en plus grande ;

2° Que l'effet lumineux devient sensiblement indépendant de la force électromotrice permanente.

En prenant ensuite deux lames de cuivre chauffées

au rouge, passées au papier d'émeri, non oxydées, non paraffinées et, toujours plongées dans la solution NaI au 1/100e, la force électromotrice permanente est insignifiante, même en éclairant successivement les deux lames.

Si, après avoir polarisé par l'élément Daniell, successivement pendant 5 secondes, 1 minute, 4 minutes, 10 minutes, on recherche chaque fois l'effet de l'éclairement sur les deux lames, on observe (*fig.* 4) :

1° Que la lumière n'a aucune action sur B ;

2° Que l'action de la lumière sur A augmente avec le temps de polarisation.

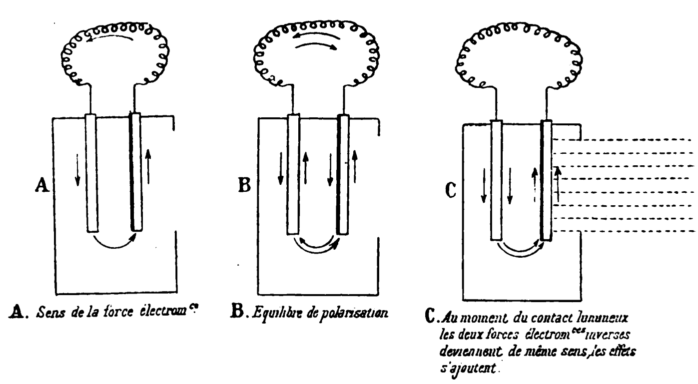
En répétant les mêmes expériences avec deux lames Cu (comme précédemment), mais paraffinées sur les faces en regard, on obtient identiquement les mêmes résultats.

Fig. 4.

Nous pouvons donc dire que la lame oxydée au bec Bunsen joue, vis-à-vis de la lame de cuivre non oxydée le même rôle qu'une lame de cuivre, en liquide conducteur, attachée au pôle + d'une pile, l'autre lame fixée au pôle —. Le sens de la force électromotrice (initiale ou permanente) est donc toujours, dans le circuit extérieur, de la lame oxydée et éclairée à la lame non oxydée placée dans l'obscurité.

A première vue, il semblerait que la lumière affectant la lame oxydée détermine un changement allotropique de l'oxygène dont les propriétés oxydantes augmenteraient proportionnellement à l'intensité lumineuse qui les provoque. Peut-être pourrait-on émettre timidement l'hypothèse, en prenant comme base les expériences de Vogel sur l'essence de térébenthine,

que la lumière, en ozonisant l'oxygène, deviendrait en quelque sorte un agent de dépolarisation qui rendrait de même sens les deux forces électromotrices inverses (*fig.* 5).



A. *Sens de la force électrom^ce* B. *Equilibre de polarisation* C. *Au moment du contact lumineux les deux forces électrom^ces inverses deviennent de même sens, les effets s'ajoutent.*

Fig. 5.

Cependant nous venons de dire que la force électromotrice augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse, en lumière faible, et que cet accroissement dépasse beaucoup la force électromotrice initiale : la lumière provoque donc, dans l'actino, d'autres phénomènes que la dépolarisation.

Afin d'avoir quelques notions sur les réactions qui se passent dans l'actinomètre, on a préparé différents appareils comme il est dit plus haut, mais en solution très concentrée, pour obtenir plus rapidement et en plus grande quantité les produits prenant naissance par suite du courant électrique.

Deux actinomètres, dont les lames avaient environ 6 centimètres carrés de surface active, ont été formés et placés, l'un à l'obscurité complète, l'autre en pleine lumière, en même temps. Dans chacun s'est produit

un précipité verdâtre se déposant peu à peu au fond du tube à essais renfermant les lames.

En recherchant, au bout de cinq jours, l'importance du précipité (et cela en agitant fortement les tubes et comparant la coloration provenant de la matière verte en suspension), on constate que le précipité formé dans l'actino maintenu à l'ombre est négligeable par rapport au précipité formé à la lumière. Celle-ci facilite donc la formation de ce précipité. D'autre part, nous avons vu qu'à un éclairement donné correspondait une certaine force électromotrice. Il y a donc en même temps et production d'un courant et formation dudit précipité.

Du reste les expériences suivantes viennent corroborer ce fait.

I. — On place en même temps dans deux solutions identiques une lame de cuivre oxydée au bec Bunsen (aucune face n'est paraffinée). L'un des tubes à essais, contenant lame et solution, est placé en pleine lumière, l'autre à l'obscurité complète ; cinq jours après, on trouve au fond du tube maintenu à l'obscurité un très léger dépôt verdâtre, et un dépôt identique, mais très abondant dans le tube éclairé. Dans ce dernier, les faces de la lame qui étaient semblables au début, sont maintenant différentes : la face la plus éclairée s'est décapée, elle a l'aspect du cuivre métallique ; l'autre, au contraire, est noirâtre. Il semble qu'un courant se soit fermé d'une face à l'autre, la face éclairée étant positive.

II. — La même expérience a été faite avec deux lames de cuivre parfaitement décapées à l'émeri fin, non oxydées, non paraffinées. Le tube placé à l'obscurité ne présentait pas trace de dépôt au bout de cinq

jours, tandis que le tube placé à la lumière avait donné un abondant dépôt, et la face éclairée avait conservé son éclat métallique, l'autre face s'étant noircie.

III. — Une lame de cuivre oxydée, paraffinée, a été, dans la même solution concentrée, placée à la lumière, la face non paraffinée étant directement éclairée pendant plusieurs jours. La solution est restée parfaitement limpide : il ne se produit plus de courant se fermant d'une face sur l'autre ; toutes les parties de la lame se trouvent dans le même état ; à la longue, la paraffine, ramollie par la chaleur (car les tubes étaient en plein soleil), laisse pénétrer le liquide sur l'autre face et la réaction habituelle prend naissance.

IV. — Une lame de cuivre oxydée, paraffinée sur la face qui ne sera pas éclairée directement est placée dans un tube à essais contenant la solution des expériences précédentes. Le tube est, sur la moitié de sa longueur, entouré de papier noir mat, par conséquent la face non paraffinée de la lame est en partie fortement éclairée, en partie dans l'obscurité.

Le précipité prend rapidement naissance et la partie éclairée de la lame prend un aspect métallique, tandis que la partie restée dans l'ombre est noirâtre. Une action chimique et un courant se sont produits en même temps, la partie éclairée étant positive par rapport à la partie restée dans l'obscurité.

A l'analyse du précipité (*), on a trouvé une combinaison d'iodure cuivrique et d'oxyde cuivrique, combinaison riche en oxyde cuivrique. C'est donc très probablement un *oxyiodure cuivrique*.

On peut rendre compte de la réaction finale par

(*) Cette analyse est due à l'obligeance de M. Recoura, maître de conférence de chimie à la Faculté des sciences de Lyon.

l'équation suivante :

$$4\,CuO + 2\,NaI + H^2O = 2\,NaHO + CuI^2\,3\,CuO,$$

réaction se produisant en même temps que le courant s'établit sous l'influence des rayons lumineux.

La suite des réactions successives serait donc :

l'*iode* se porte au pôle *négatif* et le *sodium* au pôle *positif*.

Pôle positif. — Le sodium réagit sur l'eau et donne de la soude et de l'hydrogène :

$$Na^2 + 2\,H^2O = 2\,NaOH + H^2.$$

En effet, au bout de 24 heures de fonctionnement, la réaction de la solution, neutre au début, est devenue nettement alcaline.

L'hydrogène réagit sur l'oxyde de cuivre et donne :

$$H^2 + CuO = Cu + H^2O.$$

Pôle négatif. — (Hypothèse) : L'iode naissant se combine avec l'hydrogène de l'eau et l'oxygène avec le cuivre :

$$I^2 + H^2O = 2\,HI + O,$$
$$O + Cu = CuO.$$

L'acide iodhydrique donne avec le cuivre :

$$2\,HI + Cu = CuI^2 + H^2.$$

L'oxyde cuivrique et l'iodure cuivrique prenant naissance au même pôle donnent l'*oxyiodure cuivrique*, dont la présence dans l'actino est constatée après fonctionnement. H^2 donnerait avec CuO du pôle positif de l'eau et du cuivre fournissant un courant qui s'ajoute à celui de l'actino.

(*A suivre*).

C. Maréchal et H. Rigollot.

DÉTERMINATION

DE LA

VITESSE DE PROPAGATION D'UNE PERTURBATION ÉLECTRIQUE

LE LONG D'UN FIL DE CUIVRE

A L'AIDE D'UNE MÉTHODE INDÉPENDANTE DE TOUTE THÉORIE (*)

Deux condensateurs tout pareils, A et A′ (*fig.* 1) sont formés l'un et l'autre d'un verre de lampe à gaz, garni intérieurement et extérieurement de feuilles d'étain; chacune des deux armatures externes est scindée en deux parties annulaires, isolées l'une de l'autre, a et a_1, pour l'un des condensateurs, a' et a'_1 pour l'autre. Les armatures internes sont reliées respectivement aux pôles d'une bobine d'induction, et les boules b et b' qui les terminent laissent entre elles un intervalle de 6 à 8 millimètres. De a et a' partent deux fils courts en laiton, terminés par des pointes p et p', distantes de un demi-millimètre environ; la droite pp' est horizontale. De a_1 et a'_1 partent deux fils a, cp et a', cp' ayant chacun 1.029 mètres de lon-

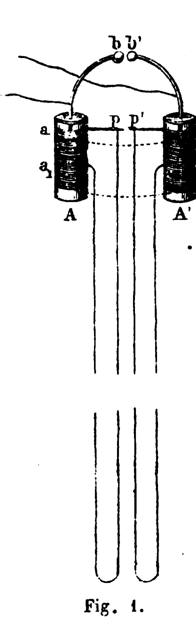


Fig. 1.

(*) *Comptes rendus*, t. CXVII, n° 17.

gueur et aboutissant aux mêmes pointes p et p' que les précédents.

Lorsque la bobine fonctionne, les deux condensateurs se chargent, grâce à deux cordes mouillées, figurées par des traits ponctués, qui permettent le passage de l'électricité de chaque armature extérieure à l'autre. La décharge survient brusquement, par une étincelle qui éclate entre les boules b et b' ; à ce moment, les charges des armatures externes deviennent libres et une différence de potentiel prend subitement naissance, entre a et a' d'une part, et entre a_1 et a'_1 d'autre part; les cordes mouillées ne jouent cette fois aucun rôle, à cause de l'extrême rapidité des phénomènes.

Les armatures a et a' se déchargent aussitôt mutuellement par une étincelle entre les points p et p'.

De même, les armatures a_1 et a'_1, reliées aux mêmes pointes par de longs fils $a_1 cp$, $a'_1 c'p'$, se déchargent par une étincelle entre p et p' ; mais, cette fois, l'étincelle n'éclate qu'après que la perturbation originelle a parcouru, en suivant les longs fils $a_1 cp$, $a'_1 c'p'$, un chemin de 1.029 mètres.

On a ainsi, entre les pointes p et p', deux étincelles successives, séparées par le temps qu'une perturbation électro-magnétique emploie pour parcourir un chemin de 1.029 mètres le long du fil de cuivre; pour déterminer la vitesse de cette propagation, il suffit de mesurer l'intervalle de temps qui s'écoule entre les deux étincelles. A cet effet, concentrons la lumière de l'étincelle à l'aide d'un miroir concave mobile autour d'un axe parallèle à pp' et recevons sur un écran vertical l'image de l'étincelle; lorsque le miroir est mis en rotation rapide, l'image se dédouble, et il est

aisé, connaissant la vitesse de rotation du miroir, la distance de celui-ci à l'écran et l'écartement des deux images, d'en déduire l'intervalle de temps qui s'est écoulé entre les deux étincelles.

En substituant à l'écran une plaque sensible, j'obtiens deux images photographiques dont je mesure après coup l'écartement.

Le miroir est mis en rotation par une machine de Gramme, à aimants permanents, actionnée par 28 éléments au bichromate; la vitesse de rotation se détermine à l'aide du son d'axe; les nombres de tours par seconde étaient compris entre 233 et 309.

La ligne est formée de fils de cuivre dit de haute conductibilité, ayant 3 millimètres de diamètre; ils sont fixés aux poteaux de la ligne téléphonique qui joint la préfecture de Nancy à l'asile de Maréville.

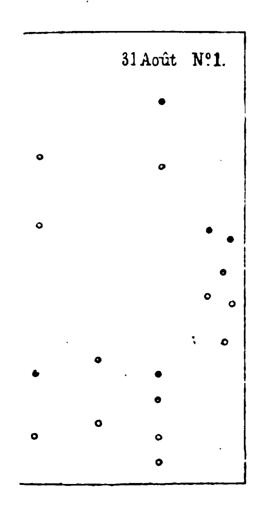


Fig. 2.

En faisant fonctionner d'une manière continue la bobine d'induction, il arrive toujours qu'au bout de quelques minutes des images viennent se former sur la plaque.

La *fig.* 2, ci-jointe, représente une portion d'une plaque photographique sur laquelle l'expérience a été répétée neuf fois; à chacune des expériences isolées correspondent deux images (négatives) placées sur une même verticale; l'image supérieure est celle de l'étincelle du court circuit; l'image inférieure, plus faible, celle du long circuit (*).

(*) Afin de diminuer cette différence d'éclat des deux images, j'ai fait

Pour déterminer l'écartement de deux images, je trace dans chacune d'elles un trait horizontal médian, puis je mesure la distance des deux traits à l'aide d'une machine à diviser.

Le tableau suivant contient les résultats de quinze expériences réparties sur cinq plaques photographiques :

				Kilomètre par seconde.
Première plaque,	moyenne de	4	expériences.	302,9
Deuxième	—	4	—	298,0
Troisième	—	3	—	293,2
Quatrième	—	2	—	295,9
Cinquième	—	2	—	292,1
			Moyenne.	296,4

Une série d'expériences faites sur une ligne ayant une longueur de 1.821^{m},4, c'est-à-dire presque double de la première, a donné les résultats suivants :

	Kilomètre par seconde.
Première plaque.	297,5
Deuxième plaque	298,5
Troisième plaque	298,0
Moyenne.	298.0

L'égalité des valeurs de la vitesse obtenue avec les deux lignes de longueur différente, montre que le mouvement de propagation est bien uniforme. Le nombre trouvé s'accorde parfaitement avec celui que j'avais obtenu précédemment par une autre méthode (*) ; les expériences, décrites dans la précédente note, ont

les anneaux des armatures externes beaucoup plus étroits pour le court circuit que pour le long.

(*) *Comptes rendus.*



l'avantage capital d'être indépendantes, non seulement de toute théorie, mais même de l'existence d'oscillations et d'ondulations électro-magnétiques.

MM. Fizeau et Gounelle ont trouvé pour la vitesse dans les fils de cuivre 177.700 kilomètres par seconde (*). Toutefois, il n'y a pas désaccord entre ce résultat et le mien : dans les expériences de MM. Fizeau et Gounelle, en effet, le contact entre l'origine du fil et la source se prolongeait pendant 1/324 de seconde et, par suite, la perturbation, pénétrant dans l'intérieur des fils, devait, d'après la théorie, avoir une vitesse de propagation apparente beaucoup plus lente que dans mes expériences, où elle est produite par la décharge d'une batterie de très petite capacité et, par conséquent, a une durée extrêmement courte, de l'ordre du 1/100.000.000 de seconde (**).

(*-**) *Comptes rendus,* t. XXX, 1850.

TÉLÉPHONIE OCÉANIQUE

Par SILVANUS P. THOMSON (*)

I. INTRODUCTION.

Il est contraire à l'esprit scientifique du progrès d'admettre qu'un art quelconque ou une application de la science puisse s'arrêter ou que son développement atteigne jamais une limite définitive. La traversée de l'Océan par le télégraphe électrique est déjà un résultat merveilleux. Parler à travers un fil est une merveille. Accélérer la transmission télégraphique par des dispositifs automatiques jusqu'à obtenir une vitesse de cinq cents mots par minute est également une belle conquête. Mais ces trois formidables progrès ne nous ont pas encore conduits au but final. Le câble sous-marin de nos jours est pratiquement identique au câble d'il y a trente ans. Il ne transmet que les signaux encore lents du galvanomètre à miroir ou du siphon recorder. Six ou huit mots par minute lentement épelés sont les limites du travail d'un câble transatlantique. Le mot téléphonique parlé et le message télégraphique automatique rapide sont

(*) Communication faite au Congrès d'électricité de Chicago. *Lumière électrique*, t. XLIX, n°s 40 et 41.

pour lui trop agiles. Pour des signaux aussi rapides il est muet.

Faraday avait prédit qu'un câble sous-marin revêtu de son enveloppe de gutta-percha retarderait la vitesse de transmission des signaux. Nombreux ont été les dispositifs imaginés pour accroître la vitesse de transmission par l'emploi de condensateurs et d'appareils analogues. C'étaient toujours des dispositifs à appliquer soit à l'extrémité transmettrice, soit à l'extrémité réceptrice du câble, ou encore aux deux à la fois. Des arrangements de condensateurs et de résistances combinés de façon à agir comme un câble artificiel, imitant la retardation dans un câble réel, sont considérés comme des adjuvants indispensables pour équilibrer les propriétés du câble afin de permettre la transmission en duplex.

Varley proposa, il y a longtemps déjà, un autre dispositif, consistant à introduire à chaque extrémité du câble un shunt inductif, c'est-à-dire de monter en shunt un fil possédant à la fois de la résistance et de la self-induction. Mais en dépit de l'emploi de condensateurs, de câbles artificiels et de shunts inductifs, la retardation dans un long câble sous-marin a été jusqu'ici insurmontable, excepté pour les signaux très lents. Pendant la transmission de chaque signal, l'enveloppe de gutta-percha se charge, et cette charge doit être éliminée avant que le signal suivant puisse être envoyé. La retardation vainc le téléphone et le télégraphe automatique rapide.

Et pourtant, aucun électricien raisonnable ne peut douter que la téléphonie océanique sera réalisée, et que les ressources de la science sont à la hauteur des difficultés du problème. C'est parce que l'auteur croit

être sur la voie de la solution cherchée qu'il présente les idées et les raisonnements qui l'y ont menée.

Si la solution à laquelle il s'est arrêté semble étrange à l'électricien télégraphiste, c'est parce qu'elle a pour origine un domaine de la science différent du sien, celui de l'étude des phénomènes que produisent les courants alternatifs. Et si la solution proposée semble impraticable à l'ingénieur accoutumé au type du câble employé depuis trente ans, l'auteur répond que c'est le rôle de l'ingénieur de la rendre pratique. Si les besoins de l'industrie exigent un nouveau type de câble, ce type trouvera son constructeur, et cela d'autant plus facilement que la perspective d'accélérer au décuple la vitesse de transmission est un puissant encouragement.

II. DISPOSITIFS NEUTRALISANT LES EFFETS RETARDATEURS DE LA CAPACITÉ DANS LES CABLES SOUS-MARINS.

La retardation des signaux dans les câbles sous-marins est due à la capacité uniformément distribuée le long du câble. Par suite de cette circonstance, tous les efforts tentés pour annuler ou compenser ses effets à l'aide de dispositifs placés aux extrémités du câble, n'ont eu qu'un succès très limité. Tandis que la vitesse ordinaire de transmission sur un câble transatlantique est d'environ huit mots par minute, il serait possible d'envoyer quatre cents mots par minute à travers une ligne de la même résistance, mais dépourvue de capacité.

Le seul moyen efficace d'annuler les effets retar-

dateurs de la capacité distribuée est d'appliquer des dispositifs également distribués le long du câble soit à intervalles, soit uniformément.

On sait que les effets de l'induction électro-magnétique sont, dans un certain sens, réciproques de ceux de la capacité. L'exemple le plus familier est celui des actions opposées de la self-induction et de la capacité sur la phase d'un courant alternatif. Il est évident que si l'on peut employer la capacité électrostatique pour corriger les effets de l'induction électro-magnétique, on peut également se servir de celle-ci pour combattre les effets retardateurs de la première.

Il y a deux modes principaux d'action de l'induction électro-magnétique, l'induction mutuelle, de fil à fil, et la self-induction entre parties d'un même courant. Les deux effets sont dus aux charges magnétiques créées par les courants.

Théoriquement, il existe un très grand nombre de moyens de compensation de la capacité distribuée par l'induction électro-magnétique. Il suffira de considérer deux cas simples, et pour plus de simplicité, nous supposerons qu'il s'agisse d'un câble contenant deux fils isolés : l'un pour l'aller, l'autre pour le retour. La *fig.* 1 représente ce cas ; AA la ligne d'aller, et BB le

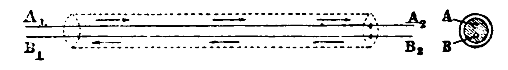


Fig. 1.

fil de retour. Dans les figures suivantes l'enveloppe des câbles ne sera pas indiquée.

PREMIER CAS. *Emploi de dispositifs à self-induction.* — Dans ce cas, une série de bobines de self-induction

de haute résistance sont placées à intervalles entre le conducteur A et le conducteur B. Afin de mieux saisir les actions en jeu, on pourra recourir à la *fig.* 2, qui schématise la capacité répartie le long du câble.

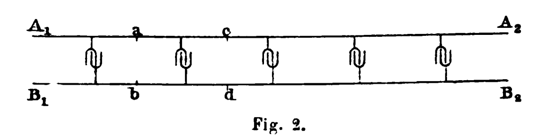


Fig. 2.

Supposons que les signaux soient envoyés de gauche à droite et qu'un courant soit lancé dans le circuit en A_1 par un transmetteur relié $A_1 B_1$. Lorsque le potentiel s'élève en A_1, le potentiel d'un autre point *a* de ligne ne croît pas simultanément, par suite de la capacité du conducteur intermédiaire. Le potentiel en *a* ne peut atteindre sa valeur finale avant que le condensateur entre A_1 et *a* n'ait reçu sa charge. De même le potentiel en *c* ne croît pas en même temps que le potentiel en *a*, l'action de la capacité entre *a* et *c* s'y opposant. En un mot, une partie du courant tend toujours à charger les condensateurs et l'autre partie seulement est transmise. Si rien ne s'oppose à cette action, les condensateurs absorbent et renvoient le courant, dont une fraction insignifiante seulement atteint l'extrémité A_2.

Maintenant, supposons que des bobines de self-induction soient placées entre les deux brins du câble,

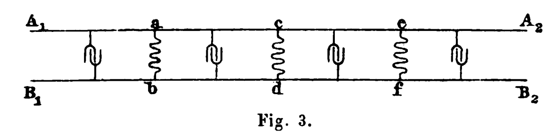


Fig. 3.

à intervalles réguliers, comme dans la *fig.* 3. L'action de ces bobines est de compenser les effets de la capacité ; voici comment :

Lorsque le potentiel s'élève en *a*, le courant commence à traverser la bobine *a b*, et, par suite de la self-induction de celle-ci, ce courant subsiste après que la force électromotrice qui le produit a commencé à diminuer. Les actions des condensateurs et des bobines de self-induction ont donc des effets opposés. Varley a employé un shunt inductif à une extrémité du câble, mais ce shunt ne compense la capacité que sur une vingtaine de milles du câble. Il est donc nécessaire de distribuer les bobines de self-induction sur toute la longueur du câble.

L'auteur a appliqué ses calculs à un exemple pratique. Il prend le cas d'un câble à double fil ayant une capacité d'un tiers de microfarad et une résistance de 10 ohms par mille ; il place ses bobines compensatrices de dix en dix milles ; si ces bobines ont un coefficient de self-induction de 100 henrys et une résistance de 3.000 ohms chacune (la constante de temps étant alors d'environ 3/100 de seconde), les variations de courants de l'ordre des courants téléphoniques seront pratiquement instantanées, et la valeur du courant ne dépendra plus que des résistances des bobines en shunt. On sait que l'on peut shunter considérablement les courants téléphoniques sans les rendre imperceptibles. Il y a donc lieu de croire que cette méthode, qui se sert des parties dérivées du courant pour neutraliser la retardation, peut donner de bons résultats.

Le câble ainsi construit avec deux fils réunis par des dispositifs compensateurs placés à intervalles de 10, 20 ou jusqu'à 500 milles, est représenté par le diagramme *fig.* 4. Il reste donc à résoudre le problème de trouver des compensateurs ayant une constante de temps suffisamment grande, sans être trop volumineux.

L'auteur a essayé divers dispositifs : de longues bobines à noyau de fil de fer fin, à circuit magnétique ouvert ou fermé ; d'autres formées seulement de fil de fer. La

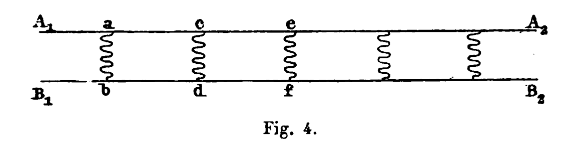


Fig. 4.

self-induction d'un fil de fer d'un millimètre enroulé d'une couche épaisse de trois millimètres de fil de fer est d'environ 0,1 henry par kilomètre, et sa résistance de 144 ohms. Cette disposition n'offre pas d'inconvénient au point de vue de sa situation entre deux points éloignés du câble, car les bobines compensatrices peuvent être disposées comme l'indique la *fig.* 5. Cette

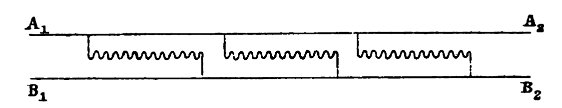


Fig. 5.

construction, qui se recommande spécialement pour les câbles de longueur modérée revient, en somme, à un câble à trois fils, dont l'un possède de la résistance et de la self-induction et se trouve relié par intervalles aux deux autres fils du câble, comme dans la *fig.* 6.

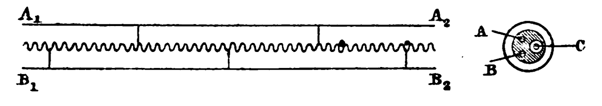


Fig. 6.

DEUXIÈME CAS. *Emploi de dispositifs à induction mutuelle.* — Dans ce cas, le câble est divisé en sections

dont chacune agit inductivement sur les sections adjacentes ; là encore on peut imaginer de nombreuses variantes : divisons les deux conducteurs du câble en longueurs égales, et plaçons dans les diverses parties des bobines à induction mutuelle. Le câble serait alors disposé comme l'indique la *fig.* 7.

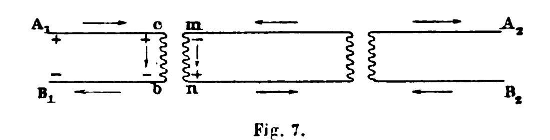


Fig. 7.

On voit que si le courant dans la ligne A augmente et se dirige vers *a*, l'action inductive produit dans la section suivante un courant augmentant simultanément, mais de sens contraire au premier, de sorte que tandis que le potentiel en *a* augmente, celui en *m* diminue. Il en résulte que les courants nécessaires pour neutraliser les charges accumulées par la capacité n'auront pas, comme dans les câbles ordinaires, à parcourir toute la longueur d'une extrémité à l'autre, mais n'auront à parcourir que la demi-longueur d'une section. Donc, si l'on divise un câble de 2.000 milles de longueur en 25 sections de 80 milles, il n'y a pas plus de retardation que dans un câble ordinaire de 40 milles. Il n'est

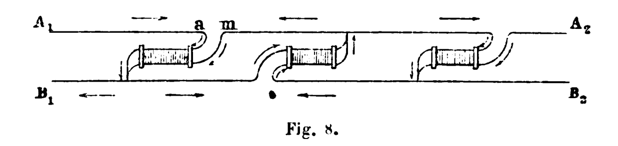


Fig. 8.

pas nécessaire de diviser à la fois les deux lignes. Dans la *fig.* 8, par exemple, la division est obtenue sans solution de continuité de la ligne B. Ou bien, le

sectionnement peut être réparti alternativement sur les deux lignes comme dans la *fig*. 9.

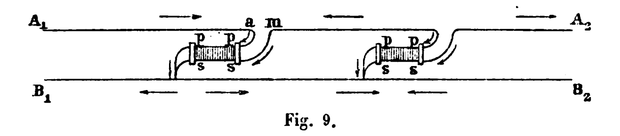


Fig. 9.

Si l'on emploie trois conducteurs, dont l'un peut être constitué par l'armature, le sectionnement peut être réalisé comme l'indique la *fig*. 10.

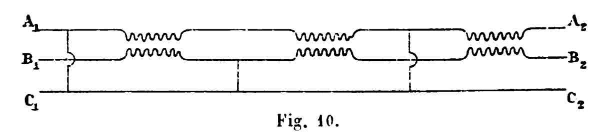


Fig. 10.

On est naturellement conduit à employer des bobines d'induction très longues, comme, par exemple, un transformateur très allongé ou le câble transformateur proposé par MM. Siemens et Halske, il y a quelques années. Ou bien, comme l'a indiqué l'auteur en 1891, on peut se servir de l'induction mutuelle entre les conducteurs du câble lui-même, simplement en les entourant de fer. Le câble devient alors un assemblage de trois fils parallèles, dont deux agissent l'un sur l'autre par induction mutuelle, et sont reliés par intervalles comme le montre la *fig*. 11.

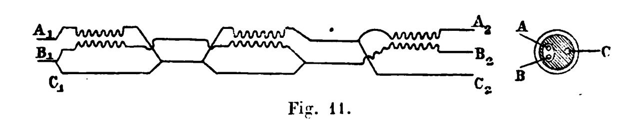


Fig. 11.

Enfin, il est possible d'avoir de l'induction mutuelle entre deux fils qui ne font pas partie de circuits fermés, comme dans le phonopore de M. Langdon Davies.

III. DE LA POSSIBILITÉ D'EMPLOYER EN PRATIQUE DES DISPOSITIFS D'INDUCTION POUR COMPENSER LA RETARDATION.

Étant donné que le shunt de Varley appliqué aux extrémités d'un câble permet de compenser jusqu'à un certain point des effets de la capacité, et que sur les longues lignes terrestres la vitesse de transmission peut être accrue en insérant dans la ligne des translateurs, ou simplement par la présence d'un défaut, il est curieux que l'on n'ait pas songé plus tôt aux solutions très simples que l'on propose maintenant. Peut-être faut-il attribuer cet état de choses à la répugnance qu'inspire l'idée de créer délibérément des défauts sur les lignes, quoique ces défauts aient une grande résistance et, dans les dispositions décrites, ne soient pas susceptibles de varier.

L'idée de répartir les shunts le long de la ligne semble d'ailleurs avoir été conçue vaguement par M. Willoughby Smith, en 1879. Mais il semble n'avoir pu la réaliser parce que les électro-aimants employés ne fonctionnaient pas d'une façon satisfaisante. D'autres électriciens ont proposé l'emploi de shunts inductifs entre la ligne et la terre; parmi eux, nous trouvons M. Lockwood et M. Edison. Celui-ci applique dans son brevet n° 135531 des shunts inductifs pour combattre la charge statique de la ligne. En 1890, M. Carty décrivit des dispositions de lignes dans lesquelles les électros des sonneries étaient placés en dérivation; il trouva qu'une ligne munie de huit électro-aimants ainsi disposés aux stations intermédiaires transmettait mieux la parole qu'une ligne n'ayant que

deux électro-aimants en dérivation. Sur la ligne téléphonique Paris-Londres, on a également remarqué que l'insertion en dérivation de récepteurs téléphoniques sur les parties intermédiaires de la ligne était plutôt favorable à la transmission entre les deux extrémités. Il est donc raisonnable d'admettre qu'en systématisant l'emploi des shunts, en les répartissant méthodiquement, le câble le plus long pourra être disposé de façon à transmettre la parole.

L'auteur a fait de nombreuses expériences avec des condensateurs et des résistances groupées de façon à imiter les câbles réels avec toutes leurs propriétés. Un de ces câbles artificiels, par exemple, était formé d'une résistance de 7.000 ohms et d'une capacité de 10 microfarads. Il était impossible de communiquer téléphoniquement entre ses deux extrémités. Or, l'insertion d'une seule bobine de self-induction, de 312 ohms seulement de résistance et d'une constante de temps de 0,005 de seconde, a permis la transmission téléphonique, excepté seulement pour les sons très aigus.

Un résultat curieux de ces expériences, c'est que des transmetteurs téléphoniques munis de bobines d'induction ne peuvent presque pas servir dans la transmission par câble. L'enroulement en fil fin présente probablement trop de self-induction en série dans le circuit. Il est évident qu'il faudra sur ce point introduire des modifications.

Jusqu'ici nous avons examiné l'efficacité des dispositifs à self-induction. L'expérience a montré que l'induction mutuelle peut aussi donner des résultats pratiques. Une règle bien connue dit que la retardation dans un câble est proportionnelle au carré de la longueur. Si donc on divise une ligne de 2.000 milles de

longueur en deux tronçons de 1000 milles que l'on relie par un relais, la retardation totale se trouvera considérablement réduite, au moins de moitié. Seulement, dans ce cas, il est évident qu'une partie de l'énergie électrique sera absorbée dans le relais, quelle que soit la construction de celui-ci, fût-il même constitué par une simple bobine à induction mutuelle.

Pour les lignes terrestres on a souvent proposé le sectionnement; Edison, par exemple, a proposé ce moyen dans son brevet n° 150848. On peut objecter à l'emploi des bobines d'induction qu'elles ne sont jamais assez bien construites au point de vue inductif. Si le flux dû à l'un des enroulements n'est pas intégralement embrassé par l'autre, la self-induction de chaque bobine n'est pas complètement équilibrée. L'induction mutuelle tend à compenser la self-induction des deux circuits; mais pour arriver à une compensation complète, il faut que la totalité de chaque circuit soit en relation inductive avec l'autre. Dans l'application en question, ces bobines devront donc être spécialement construites et intercalées à intervalles très réguliers.

Le câble lui-même devra être exempt de self-induction autant que possible. Il ne devra pas être construit comme sont les câbles transatlantiques, c'est-à-dire avec un seul conducteur entouré d'une enveloppe de fer, qui ajoute au circuit une énorme impédance. Dans les câbles à deux conducteurs placés côte à côte, l'enveloppe de fer, renfermant les deux fils, augmente heureusemeut leur induction mutuelle. Comme l'a fait remarquer l'auteur, en 1890, lors de la discussion relative à la ligne Paris-Londres, l'induction mutuelle du câble à deux conducteurs est un avantage, et donne

une transmission bien meilleure que ne l'avaient fait prévoir les considérations ne tenant compte que de la capacité et de la résistance. Dans une construction comme celle de la *fig.* 6, le fer employé à augmenter la self-induction des compensateurs servira également, s'il est convenablement disposé, à accroître l'induction mutuelle entre les deux fils. L'expérience acquise dans les applications du courant alternatif, parle à ce point de vue en faveur des dispositions proposées pour la téléphonie océanique de l'avenir.

Discussion (*). — M. le professeur Jamieson proteste contre la vitesse de transmission indiquée par M. S.-P. Thompson, qui corrige son premier dire et donne le chiffre de 25 mots par minute, plus voisin de la réalité. Il objecte aussi contre le prix élevé du câble, qui doublerait de prix, et demande comment il sera possible de localiser les fautes sur un câble semblable.

M. Chas. Cuttriss cite des expériences qui démontrent combien les résultats obtenus avec des câbles artificiels sont fallacieux et conduisent à des conclusions erronées.

M. Arthur Heaviside confirme par son expérience personnelle les principaux faits avancés par l'auteur.

M. Alex. Siemens signale les difficultés de construction du câble et affirme qu'il coûterait beaucoup plus cher qu'un câble simple fournissant la même vitesse de transmission. La capacité n'est pas le seul ennemi de la télégraphie océanique, l'électrification de l'isolant joue un rôle important, et c'est pour cela que les lignes aériennes n'offrent aucune difficulté pour la téléphonie, l'air ne présentant pratiquement aucune électrification.

(*) *Industrie mécanique*, n° 42.

mais les dispositifs suggérés par M. le professeur S.-P. Thomson ne remédient en aucune façon à cette électrification.

M. le professeur Cross fait remarquer que des expériences un peu rudimentaires, faites sur la ligne qui relie New-York à Boston, ont montré qu'il n'arrive que 1 p. 100 du courant au bout de la ligne.

TRANSMISSION DES SIGNAUX A DISTANCE

PAR L'ÉLECTRICITÉ

D'après M. PREECE (*)

La presse américaine, commentant un travail donné par M. Preece en lecture au Congrès des électriciens de Chicago, s'occupe beaucoup de la possibilité de la transmission des signaux au moyen de l'électricité à travers l'espace.

Dans son étude M. W. Preece rappelle une expérience faite par Henry en 1842, dans laquelle la décharge d'une bouteille de Leyde dans une chambre de son habitation influençait magnétiquement des aiguilles placées dans une cave située à 10 mètres en dessous.

Plus tard, l'introduction du téléphone permit, grâce à la merveilleuse sensibilité de cet appareil, de se rendre compte des effets résultant du voisinage de fils conducteurs à des distances surprenantes.

La pratique journalière des téléphones à un seul fil, avec retour par la terre, comme ceux employés jusqu'à ce jour en Angleterre, montre combien ces effets nuisibles peuvent devenir sensibles.

L'auteur pose en principe que, étant donnés deux conducteurs séparés l'un de l'autre par une certaine

(*) Communication lue devant le Congrès des électriciens de Chicago. (*Électricien*, nos 147 et 148.)



distance, chacun d'eux faisant partie d'un circuit distinct partiellement fermé par la terre ou entièrement métallique, qu'il désigne sous les noms de circuits primaire et secondaire, on peut obtenir, dans ce dernier circuit, des courants soit par conduction, soit par induction. Il distingue trois cas :

1° Courants terrestres;

2° Effets d'induction électrostatique;

3° Effets d'induction électro-magnétique.

1° *Effets de conduction.* — L'intensité des effets dus aux courants terrestres dépend de la conductibilité des milieux.

Avec le courant alternatif l'emploi du téléphone permet une investigation facile. Les variations d'intensité du courant secondaire correspondent à un changement de ton de la note rendue par l'appareil.

On obtient aussi avec la clef Morse des signaux intelligibles.

En employant comme extrémité du circuit secondaire des tiges conductrices enfoncées en terre à une dizaine de mètres de distance l'une de l'autre, on explore facilement la région dans laquelle les effets sont sensibles.

A Londres, le courant employé à la traction des trains de chemin de fer (City and South London) influencent des galvanomètres enregistreurs placés à 4 milles et demi et on pourrait en tirer des diagrammes de la marche des trains.

D'après l'influence que présente la conductibilité du milieu, il est facile de comprendre pourquoi les effets sont plus intenses en été qu'en hiver, le sol étant moins conducteur.

Les courants continus seuls permettraient, avec des

instruments très sensibles, de séparer la part revenant à l'induction et à la conduction dans ces effets, les phénomènes d'induction cessant avec la période variable du courant primaire.

2° *Effets d'induction électrostatique.* — Un corps A étant électrisé d'une façon quelconque et isolé électriquement, il se forme autour de lui un champ électrique dont les lignes de force rayonnent dans toutes les directions. Si un second corps B placé dans le voisinage se trouve coupé par une partie de ces lignes de force, il est électrisé par induction. Au cas où ce corps est en communication avec la terre ou avec un condensateur de très grande capacité, la charge de même nom que celle de A disparait et le corps reste électrisé en sens inverse par l'inducteur.

Des lignes de force réunissent alors les deux corps à travers le diélectrique. Si on inverse ou supprime la charge de A, les mêmes effets se produisent sur D.

Si, en particulier, l'inducteur est formé par un cylindre A entouré par un autre B, les lignes de force rayonnent de l'un à l'autre et la charge totale de B est égale et de signe contraire à celle de A. A peut être un conducteur faisant partie d'un circuit fermé dans ce cas particulier ; le passage d'un courant à travers A influencera électriquement B et sa cessation ou son inversion faisant varier la charge de celui-ci amèneront à ses deux extrémités en contact avec la terre des courants momentanés en sens inverse l'un de l'autre, de telle sorte qu'en un point médian il n'y ait aucun courant. Cette circonstance permet de distinguer la part revenant aux actions électrostatiques des effets dus à l'induction électro-magnétique, qui est la même dans toute la longueur du conducteur.

3° *Effets d'induction électro-magnétique.* — Deux circuits voisins agissent enfin l'un sur l'autre par suite des variations des lignes de force magnétique créées, dans les milieux magnétiques ou non, par le passage de courants. L'intensité des effets dépend de l'intensité du courant primaire, de la rapidité de ses variations, de la résistance du circuit secondaire, enfin de la distance qui sépare les deux circuits et de leur longueur.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES.

Depuis 1885, M. Preece s'est livré à de nombreuses expériences pour établir les lois et les conditions qui déterminent la distance à laquelle ces influences magnétiques peuvent être pratiquement sensibles. Les instruments d'investigation employés ont été soit le téléphone, soit un galvanomètre à réflexion très sensible. S'il est fort difficile de juger de l'intensité d'un son dans le téléphone et si les résultats de son emploi sont fort incertains, même alors que plusieurs observateurs refont les mêmes expériences, il n'en est pas de même de la limite de perception des sons rendus, qui est au contraire très nette et donne des résultats concordants et fort satisfaisants avec plusieurs observateurs employant le même téléphone. Le nombre des observateurs n'a jamais dans ces expériences été inférieur à trois et a parfois atteint le nombre de sept. On a donc observé d'après ce qu'on pourrait appeler l'oreille moyenne.

1re *Expérience.* — Deux inducteurs ayant été disposés suivant un carré dont chaque côté avait environ 400 mètres de longueur et la distance entre les deux étant d'environ 400 mètres, des signaux transmis avec

une clef Morse dans le premier circuit étaient clairement interprétés dans le second au moyen du téléphone; pour prouver que les actions électro-magnétiques avaient seules une influence, et que les effets électrostatiques étaient pratiquement nuls, les circuits furent ouverts et l'une des extrémités restant isolée, l'autre fut mise à la terre; on ne put de la sorte percevoir aucune action dans le circuit secondaire, ni avec le téléphone ni avec le galvanomètre, malgré que la distance des deux circuits fût réduite à 4 ou 5 mètres.

2e *Expérience*. — Les deux conducteurs de 400 mètres de côté disposés en carré ayant été placés comme ci-dessus et l'éloignement modifié depuis 7 jusqu'à 180 mètres, des courants de 1 et de 2 ampères furent envoyés dans le courant primaire. Dans tous les cas, le galvonomètre à miroir indiqua dans le circuit secondaire une intensité double dans le cas du courant de 2 ampères. La proportionnalité existe donc entre les intensités des deux circuits, quelle que soit la distance.

3e *Expérience*. — Deux fils conducteurs étaient placés parallèlement à 1.800 mètres de distance, le circuit primaire ayant 3.600 mètres de long et le secondaire étant divisé en deux parties égales de 1.800 mètres chacune. Avec un courant primaire de 0,22 ampères, le téléphone cessa de rendre un son pour une résistance du circuit secondaire complet de 85 ohms, le téléphone étant en communication avec les deux extrémités de l'une ou de l'autre des deux moitiés du circuit secondaire rectiligne.

Avec la même intensité du courant secondaire, le téléphone resta muet pour une résistance totale de 170 ohms, la communication étant prise aux extrémités des deux parties réunies en une seule.

Le courant primaire fut porté successivement à 0,44, puis 0,88 ampères, soit doublé, puis quadruplé. La résistance limite des circuits dans chaque cas suivit la même proportion.

M. Preece continue son étude sur les effets magnétiques des courants à distance les uns sur les autres, dans le cas de circuits rectilignes et parallèles de longueur finie ou infinie et de figures rectangulaires parallèles ; il établit, pour chaque cas particulier, les lois de variation des effets en fonction des longueurs des circuits et des distances qui en séparent les différentes parties. L'auteur passe ensuite aux expériences pratiques qui ont été réalisées.

Le détroit de Bristol semblait être un endroit propice pour essayer la possibilité de communiquer sans conducteur intermédiaire à une distance de 5 à 6 kilomètres. Deux îlots, Flatholm et Steep Hohn, sont situés en face de Penarth et de la pointe Lavernoch dans le voisinage de Cardiff. Un phare s'élève sur le premier de ces îlots. Un circuit de 1.250 mètres environ fut établi à terre sur une ligne de poteaux avec des fils de cuivre, le circuit étant fermé par la terre.

Sur le sable, à la laisse de basse mer, parallèlement, et à environ 600 mètres de ce circuit primaire, furent disposés deux câbles conducteurs ordinaires, isolés à la gutta, et un câble nu ; leurs extrémités étant en relation avec la terre par deux barres de cuivre enfoncées dans le sable.

L'un des câbles à gutta était entouré par un fil de fer, de manière à représenter un câble armé. La marée, qui monte à cet endroit d'environ 10 mètres, recouvrait périodiquement ces câbles.

Un câble isolé à la gutta était pareillement disposé

sur une longueur d'environ 600 mètres sur l'île de Flatholm à environ 6 kilomètres de distance.

Enfin un dernier câble isolé à la gutta et long de 900 mètres environ était remorqué à petite vitesse par un canot à vapeur, son autre extrémité étant fixée à un flotteur formant bouée, de telle sorte que le conducteur restait à peu près étendu à la surface de la mer. Ce câble fut successivement allongé dans diverses orientations et à des distances diverses du circuit primaire et des îles.

Le générateur employé à terre était un alternateur donnant 192 périodes par seconde avec un voltage de 150 volts, l'intensité pouvant atteindre 15 ampères. Une clef Morse servait à émettre ces courants alternatifs en en faisant des signaux, lesquels étaient interprétés au moyen de récepteurs téléphoniques, intercalés dans les circuits secondaires, les mêmes instruments étant employés pour toutes les expériences.

Ces expériences avaient pour but non seulement de voir jusqu'à quel point était pratique la communication avec le phare, mais encore de distinguer les effets dus à la conductibilité de l'eau de ceux dus uniquement à l'induction magnétique, et aussi de se rendre compte des effets que pourraient avoir l'eau ou l'air interposés entre les conducteurs.

Un effet fort curieux constaté dans ses expériences : c'est qu'un câble suspendu près de la surface de l'eau ne rendait plus aucun son dès qu'on le laissait plonger dans l'eau ; les deux circuits étant à 2 kilomètres de distance plus près de terre, la différence était moins sensible. Cette absence de son complète dans le câble submergé, surprenante au premier abord, peut s'expliquer soit en admettant que l'eau de mer, qui est un

conducteur, agit comme un écran dissipant les vagues électro-magnétiques, soit, au contraire, que celles-ci sont réfléchies en dehors de la surface.

On n'éprouva aucune difficulté à communiquer entre la côte et Flatholm, soit à une distance de 6 kilomètres environ. L'essai fait sur Steep Hohn à 10 kilomètres de distance fut moins bon : on percevait bien des sons, mais l'interprétation de la dépêche était impossible ; la limite pratique était atteinte. Avec la force dont on disposait, il n'est pas douteux que, si les lignes eussent été plus longues, ou le courant primaire plus puissant, on eût pu converser avec Steep Hohn aussi bien qu'avec Flatholm.

Dans le cas de lignes parallèles, la distance à laquelle les effets sont sensibles augmente avec le carré de la longueur des circuits ; par suite, en pratique, si on peut donner aux circuits primaires et secondaires une longueur suffisante, il serait facile de communiquer par-dessus un canal ou un fleuve à travers l'espace.

Il est à remarquer que la proportion des distances au carré des longueurs n'est pas plus exacte à cause des troubles apportés par les effets inverses des courants de retour par la terre ; toutefois, il est hors de doute qu'avec deux conducteurs de 20 kilomètres chacun, on communiquerait facilement à 20 kilomètres de distance.

La communication à travers l'espace est donc, ainsi comprise, impossible entre un phare ou un bateau-feu isolé, par exemple, et une côte ; et c'est précisément en vue de ce résultat que ces études avaient été dirigées. La longueur du circuit secondaire doit, en effet, être considérable et, pour bien faire, au moins égale à la distance séparant les deux postes ; en outre, les appareils à employer sont encombrants et coûteux, et

il sera souvent plus économique et plus simple de poser un câble sous-marin ordinaire.

Cependant M. Preece regarde la communication entre la France et l'Angleterre par-dessus la Manche comme une chose réalisable, et le système pourra trouver une application utile entre des îles séparées par des chenaux rocheux, avec de forts courants, dans des parages où la mer est souvent mauvaise.

En particulier, il serait possible de communiquer aussi avec une ville assiégée par exemple ou entre deux armées séparées par un fleuve ou même par des ennemis.

Une autre application de cette méthode signalée par M. Preece et qui rendrait de grands services serait de faire telle installation de câbles que les phares ou les sémaphores pussent produire dans l'espace voisin des ondes magnétiques qui, recueillies par un navire cherchant à atterrir, lui indiqueraient la position dans laquelle il se trouve. Le grand avantage de cette manière de faire, si elle se réalisait, serait de n'avoir plus à tenir compte ni de la nuit ni des brouillards.

Quant à la réalisation pratique de ce système, M. Preece n'en parle pas; elle nous semble pourtant difficile à concevoir pratiquement.

La communication précédente a été discutée ensuite par M. Lockwood, qui, malgré les expériences citées, veut voir à la conduction une part beaucoup plus grande dans les phénomènes observés que celle que lui assigne l'auteur; des expériences datant de Morse et très analognes à celles de M. Preece sont citées. En particulier, Morse aurait placé de part et d'autre de chaque côté d'une source deux fils longs reliés à la terre par leurs deux extrémités; avec une pile et une clef Morse

les signaux furent interprétés très facilement; la chose fut abandonnée pour des raisons purement commerciales.

Beaucoup de personnes, et en particulier M. Dumay, de la Banque d'Angleterre, en 1853, se sont occupés de cette question, mais n'ont jamais abouti.

Quant à la question des troubles apportés par la traction électrique, en Angleterre en particulier, M. Lockwood déclare que les mêmes troubles qui se sont produits en Amérique, sont dus probablement autant à la conduction qu'à l'induction électro-magnétique et que, pour la faire disparaître, il faudrait avoir pour la traction et pour les téléphones, deux circuits complets indépendants et non inductifs.

En terminant, M. Lockwood met en doute la possibilité de rendre jamais pratique les idées de M. Preece et croit que la chose n'est pas assez mûre pour que les navires et les phares soient munis des dispositifs *ad hoc*. La question de la destination du signal à tel ou tel navire ou phare n'est pas résolue et l'appel n'existe pas, sans compter que, pour arriver à interpréter les signaux, il faudrait au préalable une direction spéciale.

M. L.

CHRONIQUE.

Quartz piezo-électrique de MM. J. et P. Curie (*).

Cet instrument se compose essentiellement d'une lame de quartz, sur laquelle on exerce des tractions à l'aide de poids placés dans un plateau. Cet action mécanique provoque un dégagement d'électricité sur les faces de la lame.

La lame de quartz est montée solidement à ses extrémités dans deux garnitures métalliques. Elle est suspendue à la partie supérieure; elle soutient, à son tour, à la partie inférieure, le plateau et les poids, par l'intermédiaire d'une tige munie de crochets.

L'axe optique du quartz est dirigé horizontalement, suivant la largeur de la lame. Les faces sont normales à un des axes binaires (ou axes électriques) du cristal. On exerce les tractions dans le sens vertical, c'est-à-dire dans une direction à la fois normale à l'axe optique et à l'axe électrique.

Les deux faces de la lame sont argentées.

On a tracé dans l'argenture de chaque face deux traits fins, qui isolent des montures la plus grande partie de la surface. On recueille l'électricité, sur ces portions isolées, à l'aide de deux lames de cuivre faisant ressort, qui viennent s'appuyer sur les deux faces et communiquent avec les bornes de l'appareil.

Lorsque l'on place les poids dans le plateau, on provoque le dégagement de quantités d'électricité égales et de signes contraires sur les deux faces de la lame.

Lorsque l'on retire des poids, le dégagement se fait encore, mais avec inversion des signes d'électricité dégagée sur chaque face.

(*) Société centrale des produits chimiques.

La quantité d'électricité dégagée sur une face est rigoureusement proportionnelle à la variation de traction F. On a

$$q = 0{,}063 \frac{L}{e} F.$$

L est la longueur de la partie argentée utilisée. e est l'épaisseur de la lame.

F est exprimé en kilogrammes et q est donné en unités C. G. S. électrostatiques.

On a donc avantage, lorsque l'on veut avoir des effets très sensibles, à prendre une lame longue dans le sens de la traction et peu épaisse dans le sens de l'axe électrique. La dimension parallèle de l'axe optique n'a pas d'influence sur la quantité d'électricité dégagée.

La lame de quartz est placée dans une enceinte métallique desséchée. Cette cage métallique, toutes les pièces métalliques de l'instrument et les montures de la lame de quartz sont mises en communication permanente avec la terre.

Résistance électrique du corps humain.

M. Mergier ayant abordé, il y a quelques années, le problème des mesures de la résistance électrique du corps humain, s'est tout d'abord proposé d'établir un instrument de manipulation simple qui permît d'effectuer ces mesures avec la même facilité et la même sûreté que celle de l'intensité d'un courant électrique.

Dans ce but, M. Mergier a réalisé, il y a environ un an, un premier appareil qu'il a présenté à la Société de physique. Cet instrument, construit par M. Gaiffe, est formé de deux cadres de fil conducteur disposés en croix et placés dans le champ magnétique d'un puissant aimant vertical en fer-à-cheval. Ces deux cadres sont en dérivation dans le circuit d'une pile. Leur position d'équilibre ne dépend que du rapport des résistances des deux circuits en dérivation. Elle ne varie pas lorsqu'on fait varier l'intensité dans le circuit principal en introduisant un nombre plus ou moins grand d'éléments de pile. Cette condition est assurée par l'élimination de toute force

directrice, le courant arrivant à l'équipage mobile par trois pointes métalliques disposées selon le même axe vertical et plongeant dans des godets à mercure. Le système repose sur la pointe supérieure montée sur agate, il est suspendu par un fil de cocon sans torsion.

Pour mesurer la résistance du corps humain, on place, dans le circuit de l'un des deux cadres, deux cristallisoirs avec de l'eau salée, dans lesquels le sujet à mesurer plonge les mains ou les pieds selon le cas. Le courant est amené à l'eau salée par deux fils de platine. Pour éliminer l'erreur provenant de la polarisation de ces électrodes, on dispose dans le circuit de l'autre cadre un godet rempli d'eau salée dans lequel plongent également deux fils de platine. Il existe ainsi dans les deux circuits deux forces contre-électromotrices égales et dont les effets sont nuls.

Toutefois, il faut remarquer que dans cette mesure l'erreur due à la polarisation des tissus existe encore. Mais cet instrument n'en est pas moins intéressant, car il permet de faire rapidement des mesures de résistance sur des conducteurs liquides ou, mieux encore, sur les conducteurs métalliques. On peut le rendre apériodique par l'addition d'un cylindre de fer doux placé à l'intérieur des cadres mobiles, comme cela existe dans les galvanomètres Deprez-d'Arsonval.

On peut aussi avoir un instrument dans lequel les déviations soient proportionnelles aux résistances à mesurer. Il suffit, entre autres solutions, de placer les cadres mobiles dans un champ magnétique formé de deux aimants disposés de façon que les pôles de même nom soient en regard l'un de l'autre. Ainsi monté, l'appareil comporte des applications importantes. Associé à un système bolométrique, il devient enregistreur de température à distance. Avec un système de sélénium, dans le genre de celui déjà utilisé par M. Mercadier, on peut en faire une sorte de photomètre permettant d'explorer rapidement, aux différentes heures de la journée, l'intensité des radiations atmosphériques, ce qui peut être très important au point de vue photographique.

Mais ce sont là des applications que M. Mergier se réserve de montrer réalisées, lorsque ses recherches à ce point de vue seront assez avancées.

En ce qui concerne les mesures de la résistance électrique du corps humain, dont il veut uniquement s'occuper aujourd'hui, M. Mergier estime que ces mesures demandent à être faites à l'aide de courants alternatifs, pour que toute cause d'erreur due à la polarisation et des électrodes et des tissus soit éliminée.

Il présente, dans cet ordre d'idées, un instrument construit par M. Gaiffe et établi sur le même principe que le précédent, fonctionnant avec des courants alternatifs. Cet instrument comprend toujours deux cadres en croix en dérivation, mais ici ces cadres sont fixes. A l'intérieur du champ de ces cadres est une petite bobine mobile sur une pointe ou suspendue par un fil de cocon et prenant, comme précédemment, le courant dans des godets à mercure. Pour éviter les perturbations provenant de la direction imprimée à cette bobine par le champ magnétique terrestre, une seconde bobine identique à la première, mais roulée en sens inverse, est placée à l'extérieur du champ des bobines en croix. Ces deux bobines ayant même résistance forment ainsi un système absolument astatique. La position d'équilibre de l'équipage mobile, dans cet instrument, ne subit l'influence ni des variations d'intensité dans le circuit total, ni des changements de sens du courant. Elle ne dépend que des différences de résistance des deux circuits en dérivation. Il constitue donc un instrument qui permet d'effectuer rapidement, et à l'abri des causes d'erreur provenant du fait de la polarisation, les mesures de résistance du corps humain.

En terminant, M. Mergier présente à la Société un enroulement de bobine qui permet d'amener le téléphone au silence, dans les mesures de résistances électriques, par la méthode de Kohlrausch. Cet enroulement est peut-être plus simple à effectuer que celui indiqué par M. Chaperon, et en tous cas il offre l'avantage sur celui-ci que la qualité de la bobine reste la même, quel que soit le nombre de tours de fil, tandis que, dans l'enroulement Chaperon, cette qualité dépend du nombre de couches de fil. Cet avantage est surtout sensible pour les bobines de petite résistance.

(*Bulletin international de l'électricité.*)

L'unification des filetages et des jauges de tréfilerie.

La Société d'encouragement pour l'industrie nationale vient de publier un rapport de M. Gustave Richard sur cette question. Ce rapport, minutieusement étudié et approfondi, présente un grand intérêt.

La question de l'unification des filetages a été soulevée bien des fois par des savants autorisés, et depuis longtemps les ingénieurs, les constructeurs, frappés des inconvénients qu'entraîne la diversité de nos filetages, ont fait bien des propositions pour les unifier; tels sont, en France, les projets d'Armengaud, de Denis Poulot, etc.; en Allemagne, ceux de Rouleaux, de Delisle, etc.

L'intérêt qui s'attache à cette unification est considérable. Depuis de nombreuses années, l'Angleterre et les États-Unis ont adopté des systèmes uniformes de vis qui compensent en partie, pour leurs constructions, l'infériorité résultant de l'emploi des mesures non métriques. Les systèmes employés sont ceux de Whitworth et de Sellers. Les types sont établis d'après le système des mesures anglaises dont le pouce est la base. En France, le plus grand désordre règne à cet égard. La marine, les compagnies de chemins de fer, de navigation, toutes les grandes maisons de construction ont leur type de vis, voire même plusieurs. Aussi la commission, composée de MM. le colonel Pierre, Redier, Bienaymé, Sauvage, vient de terminer son travail et de proposer un système uniforme, qui n'est aucun de ceux actuellement employés en France, mais qui par sa simplicité pourra être adopté dans tous les genres de construction.

Voici quels sont les caractères principaux du système proposé :

1° Forme du filet : un triangle équilatéral avec troncatures droites; c'est d'ailleurs une des formes les plus répandues;

2° Les pas varient de demi en demi-millimètre;

3° Une série de vingt numéros-types détermine une collection étendue de dimensions diverses, dont les pas et les diamètres sont donnés par une formule des plus faciles à appliquer;

4° Entre les diamètres-types ainsi déterminés, on peut intercaler tous les diamètres intermédiaires utiles, sans créer, grâce à l'invariabilité des pas entre deux numéros-types, un nouvel outillage.

Outre cette étude, il convient aussi de signaler la proposition de remplacer tous les systèmes de jauges, actuellement employés pour les fils métalliques, par des jauges dont les diamètres et les graduations seraient des nombres entiers de dixièmes de millimètre.

La Société d'encouragement pour l'industrie nationale se propose de provoquer, avant la fin de l'année, une sorte de congrès où seraient invités tous ceux qui s'intéressent à ces importantes questions. Le congrès discuterait et fixerait définitivement les systèmes de filetage et de jauge à employer.

(*Bulletin international de l'électricité.*)

Oscillateurs mécaniques et électriques de M. Testa.

M. Testa a fait connaître au Congrès de Chicago une nouvelle invention : ce sont les oscillateurs.

Un oscillateur mécanique, dont la caractéristique est un coussin d'air jouant le rôle de ressort, réalise une fréquence absolument constante.

Cet oscillateur peut mettre en mouvement une bobine dans un champ magnétique et donne ainsi un oscillateur électrique.

En fixant sur l'oscillateur mécanique un électro-aimant annulaire fendu transversalement sur une épaisseur de quelques millimètres, on produit un champ magnétique oscillant; un disque de cuivre, placé dans ce champ, entre rapidement en rotation.

M. Testa pense utiliser ces oscillateurs, notamment à la télégraphie harmonique et synchrome.

Gérant : Ve DUNOD. — PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

ANNALES TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1893 Novembre - Décembre

NOTE

SUR LA

MEILLEURE DISPOSITION DES FILS DES CIRCUITS

DANS LES RÉSEAUX TÉLÉPHONIQUES AÉRIENS

L'expérience prouve que les réseaux téléphoniques aériens à double fil donnent des résultats bien supérieurs aux réseaux à simple fil. La différence est telle que, malgré l'augmentation de dépenses, le congrès des électriciens de 1889 a voté à l'unanimité l'emploi du double fil pour tous les réseaux urbains ou interurbains.

Dans les réseaux à double fil on évite d'abord les courants produits par les variations de potentiel des terres, mais l'avantage principal consiste dans la sécurité des conversations. On n'entend pas ce qui se dit dans un circuit voisin. Ce résultat d'expérience montre que le coefficient d'induction mutuelle est faible dans le cas du double fil. Le but de la présente note est de

donner le calcul de ces coefficients d'induction mutuelle et d'en déduire la disposition la plus avantageuse des fils pour obtenir un réseau silencieux.

Pour calculer le coefficient d'induction mutuelle de deux circuits dont les conducteurs ont un diamètre négligeable par rapport à leur distance, on appliquera la formule de Neumann

$$M = \int\int \frac{ds\,ds'}{r} \cos \varepsilon$$

en étendant l'intégration au périmètre des deux circuits.

Considérons (*fig.* 1) deux fils droits parallèles de lon-

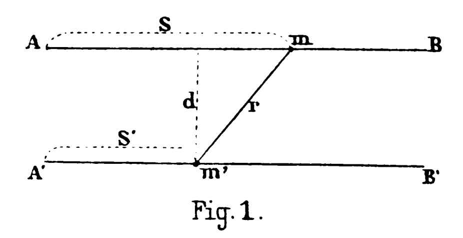


Fig. 1.

gueur l et de distance d. Prenons deux points m et m' aux distances s et s' des extrémités A et A', on aura

$$mm' = r = \sqrt{(s-s')^2 + d^2}$$

et l'application de la formule de Neumann aux longueurs AB et A'B' des circuits donnera, en faisant $\cos \varepsilon = 1$:

$$M_p = \int_0^l ds' \int_0^l \frac{ds}{\sqrt{(s-s')^2 + d^2}},$$

M_p étant le coefficient partiel relatif aux longueurs AB et A'B'. Le coefficient M s'obtiendra en faisant la somme de M_p.

Le calcul de M_p se ramène ainsi à deux intégrations

successives ; on a :

$$\int \frac{du}{\sqrt{u^2 + d^2}} = \mathcal{L}\left(u + \sqrt{u^2 + d^2}\right) + C,$$

de sorte qu'en posant $u = s - s'$, la première intégrale définie devient

$$\mathcal{L}\left(l - s' + \sqrt{(l - s')^2 + d^2}\right) - \mathcal{L}\left(-s' + \sqrt{s'^2 + d^2}\right),$$

mais on a :

$$\int \mathcal{L}\left(v + \sqrt{v^2 + d^2}\right) dv = v\,\mathcal{L}\left(v + \sqrt{v^2 + d^2}\right) - \sqrt{v^2 + d^2} + C$$

En posant $v = l - s'$, l'intégrale définie du premier terme devient

$$d + l\,\mathcal{L}\left(l + \sqrt{l^2 + d^2}\right) - \sqrt{l^2 + d^2}.$$

En posant $v = -s'$ l'intégrale définie du deuxième terme devient

$$-l\,\mathcal{L}\left(-l + \sqrt{l^2 + d^2}\right) - \sqrt{l^2 + d^2} + d,$$

d'où enfin, en additionnant les deux intégrales,

$$M_p = l\,\mathcal{L}\,\frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{-l + \sqrt{l^2 + d^2}} - 2\sqrt{l^2 + d^2} + 2d.$$

Cette formule est homogène et la dimension de M_p est bien une longueur comme on doit le trouver dans le système électro-magnétique.

Appliquons cette formule à deux circuits à doubles fils parallèles $A\,A_1$ $B\,B_1$ dont les distances respectives sont $d_1\ d_2\ d_3\ d_4$ (*fig.* 2).

On remarquera que $\cos \varepsilon = 1$ pour les fils dans lesquels le courant circule dans le même sens et $\cos \varepsilon = -1$ lorsque les courants sont de sens contraire.

Supposons les distances $d_1\ d_2\ d_3\ d_4$ très petites par

rapport à la longueur l, on pourra écrire

$$\sqrt{l^2 + d^2} = l + \frac{d^2}{2l},$$

d'où

$$M_p = l \,\pounds\, \frac{2l + \frac{d^2}{2l}}{\frac{d^2}{2l}} - 2l - 2\frac{d^2}{2l} + 2d.$$

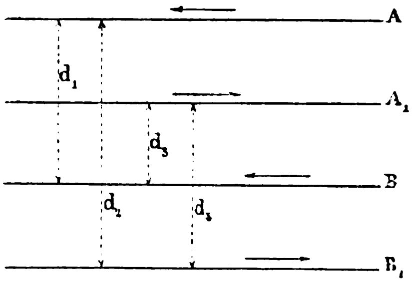


Fig. 2.

En vertu de l'hypothèse précédente sur la petitesse de d par rapport à l on peut négliger $\frac{d^2}{2l}$ par rapport à $2l$ et on a :

$$M_p = l \,\pounds\, \frac{4l^2}{d^2} - 2l + 2d$$

$$M_p = 2l \,\pounds\, \frac{2l}{d} - 2l + 2d.$$

Le coefficient d'induction mutuelle s'obtiendra en faisant la somme des termes, tels que M_p donnés par A par rapport à B et B_1 et par A_1 par rapport à B et B_1.

Les termes provenant des circuits dans lesquels les courants circulent en sens contraire doivent avoir le signe —, c'est-à-dire les termes en d_2 et d_3, d'où

$$M = 2l\left(\pounds\frac{2l}{d_1} + \pounds\frac{2l}{d_4} - \pounds\frac{2l}{d_2} - \pounds\frac{2l}{d_3}\right) + 2(d_1 + d_4 - d_2 - d_3)$$

ou

$$M = 2l \,\mathcal{L}\, \frac{d_2 d_3}{d_1 d_4} + 2\,(d_1 + d_4 - d_2 - d_3).$$

Pour que M soit nul, il faut que

$$d_1 d_4 = d_2 d_3 \quad \text{et} \quad d_1 + d_4 = d_2 + d_3$$

condition qui est réalisée quand les fils sont aux sommets opposés d'un quadrilatère dont les côtés sont égaux, losange ou carré, mais alors les plans des circuits sont perpendiculaires entre eux et on voit *a priori* que le coefficient devait bien être nul.

C'est la seule manière de rendre M complètement nul ; mais pratiquement quand l est suffisamment grand le deuxième terme est négligeable, de sorte que l'on peut pour les circuits à double fil admettre la formule

$$M = 2l \,\mathcal{L}\, \frac{d_2 d_3}{d_1 d_4}$$

dans laquelle le coefficient M est proportionnel à la longueur. Cette formule ne peut naturellement servir que pour les cas où elle a été établie, et il n'en découle pas que M est proportionnel à l pour les circuits à simple fil par exemple.

Pour que M soit évalué en henry (*), il faut que l soit en 10^9 centimètres. Si l est évalué en kilomètres ou 10^5 centimètres, M sera en 10^{-4} henry. Cette unité étant incommode, multiplions par 10^2 et nous aurons M évalué en 10^{-6} henry ou microhenry (μh), l étant en kilomètres

$$M = 2l \,\mathcal{L}\, \frac{d_2 d_3}{d_1 d_4}\, 10^2$$

(*) Le Congrès international de Chicago de 1893 a décidé que l'unité de coefficient d'induction, le quadrant s'appellerait henry.

ou

$$M = 460\, l \log \frac{d_2 d_3}{d_1 d_4}.$$

On pourra donc rendre M nul dans les limites ou la formule est applicable, c'est-à-dire avec l suffisamment grand par rapport à d, en remplissant la condition

$$d_2 d_3 = d_1 d_4.$$

Considérons l'armement ordinaire en nappes horizontales obtenu avec des isolateurs en S à 0m,30 de distance verticale (*fig.* 3). Le potelet a 0m,06 d'épaisseur.

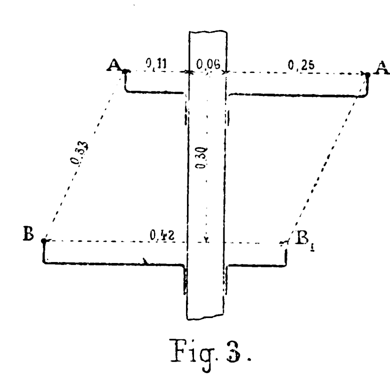


Fig. 3.

Dans ce cas, les distances sont :

$d_1 = \text{A B} = 0^m,33$
$d_2 = \text{A B}_1 = 0^m,42$
$d_3 = \text{A}_1 \text{ B} = 0^m,64$
$d_4 = \text{A}_1 \text{B}_1 = 0^m,33$

et le coefficient d'induction kilométrique est

$$M_1 = 460 \log \frac{0,42 \times 0,64}{\overline{0,33}^2} = 180\, \mu h.$$

Il n'est pas possible pratiquement, en conservant la position des circuits par nappes horizontales, d'annuler M, car le produit des diagonales sera toujours plus grand que le produit des petits côtés du parallélogramme. On serait donc conduit à diminuer les consoles et à augmenter considérablement la distance des isolateurs dans le sens vertical. Si, en conservant cet armement, on forme les circuits en prenant les fils voisins de chaque

côté du potelet, on aura (*fig.* 4) :

$$d_1 = AB = 0{,}42$$
$$d_2 = AB_1 = 0{,}42$$
$$d_3 = A_1B = 0{,}64$$
$$d_4 = A_1B_1 = 0{,}42$$

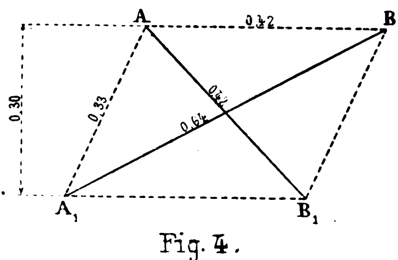


Fig. 4.

et le coefficient kilométrique devient

$$M_2 = 460 \log \frac{0.42 \times 0.64}{\overline{0,42}^2} = 83 \ \mu h.$$

Cette combinaison est meilleure et on peut arriver à annuler M en diminuant la distance 0ᵐ,30 des nappes d'isolateurs.

On arme quelquefois au moyen d'isolateurs en S et U réunis par les mêmes boulons. Les isolateurs sont à une distance verticale de 0ᵐ,17 (*fig.* 5) seulement. C'est un peu faible pour éviter les mélanges, mais comme on peut s'y attendre *a priori*, les coefficients d'induction seront plus faibles. On peut remarquer, en effet, que plus les fils d'un même circuit sont voisins, plus la surface embrassée par le flux de force produit par le circuit inducteur est petite et par suite plus l'induction est faible.

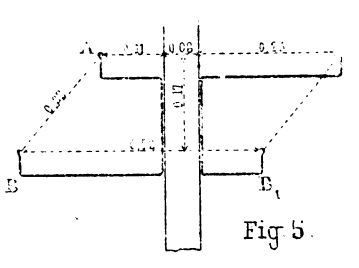


Fig. 5.

Si l'armement est fait en nappes horizontales, les distances sont :

$$d_1 = AB = 0^m,22$$
$$d_2 = AB_1 = 0^m,33$$
$$d_3 = A_1B = 0^m,59$$
$$d_4 = A_1B_1 = 0^m,22$$

et le coefficient kilométrique devient

$$M_3 = 460 \log \frac{0,33 \times 0,59}{\overline{0,22}^2} = 280 \ \mu h.$$

Si en conservant cet armement, on forme les circuits en prenant les fils voisins de chaque côté du potelet, on aura (*fig.* 6) :

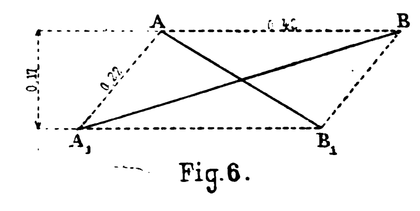


Fig. 6.

$d_1 = \text{A B} = 0,42$
$d_2 = \text{A B}_1 = 0,33$
$d_3 = \text{A}_1 \text{ B} = 0,59$
$d_4 = \text{A}_1 \text{ B}_1 = 0,42$

et le coefficient kilométrique devient

$$M_4 = 460 \log \frac{0,33 \times 0,59}{\overline{0,42}^2} = 23 \ \mu h.$$

Cette combinaison est la meilleure et on pourrait, en modifiant les dimensions des consoles, arriver à $M = 0$, mais ce résultat ne serait obtenu que pour un seul modèle de potelet.

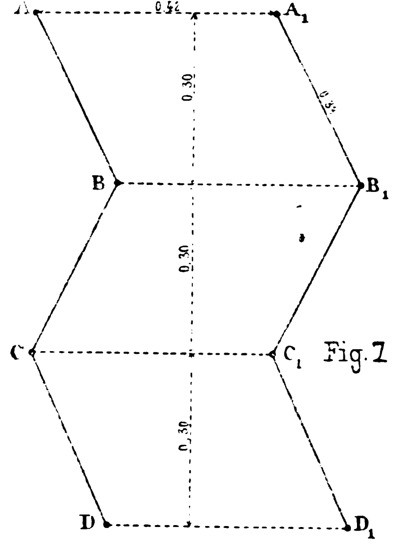


Fig. 7

Il n'y a donc pas lieu de changer les dimensions des consoles ; mais il y aurait avantage à former les circuits téléphoniques non en nappes horizontales, mais en nappes verticales.

Les coefficients d'induction entre les circuits d'un

groupe d'isolateurs et les circuits d'un groupe suivant, se calculent de la même manière. Voici les résultats pour les isolateurs en S mis à $0^m,30$, les circuits étant par nappes horizontales (*fig.* 7).

Entre AA_1 et CC_1 on a

$$d_1 = AC = 0,60$$
$$d_2 = AC_1 = 0,74$$
$$d_3 = A_1C = 0,74$$
$$d_4 = A_1C_1 = 0,60$$

d'où pour le coefficient kilométrique

$$M_5 = 460 \log \frac{\overline{0,74}^2}{\overline{0,60}^2} = 64 \ \mu h.$$

Entre AA_1 et DD_1 on a

$$d_1 = AD = 0,91$$
$$d_2 = AD_1 = 0,95$$
$$d_3 = A_1D = 1,05$$
$$d_4 = A_1D_1 = 0,91$$

d'où

$$M_6 = 460 \log \frac{0,95 \times 1,05}{\overline{0,91}^2} = 38 \ \mu h.$$

Voici enfin les résultats pour les isolateurs en S et U dont le deuxième groupe est à $0^m,30$ verticalement du précédent et en supposant les circuits par nappes verticales (*figure* 8).

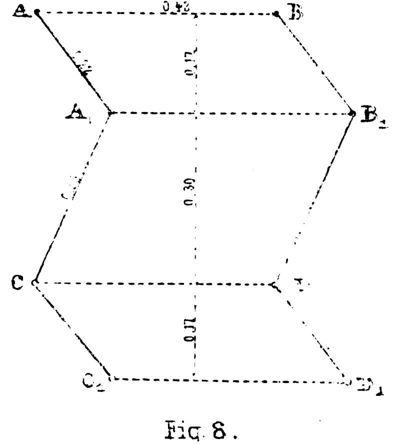


Fig. 8.

Entre AA_1 et CC_1, on a :

$$d_1 = AC = 0,47$$
$$d_2 = AC_1 = 0,65$$
$$d_3 = A_1C = 0,33$$
$$d_4 = A_1C_1 = 0,47$$

d'où pour le coefficient kilométrique

$$M_7 = 460 \log \frac{0{,}65 \times 0{,}33}{\overline{0{,}47}^2} = 4 \, \mu h \cdot$$

Entre AA_1 et DD_1, on a :

$$d_1 = A\,D = 0{,}64$$
$$d_2 = A\,D_1 = 0{,}70$$
$$d_3 = A_1\,D = 0{,}64$$
$$d_4 = A_1\,D_1 = 0{,}64$$

d'où pour le coefficient kilométrique

$$M_8 = 460 \log \frac{0{,}64 \times 0{,}70}{\overline{0{,}64}^2} = 16 \, \mu h \cdot$$

Les chiffres précédents montrent la supériorité de l'armement en nappes verticales sur l'armement en nappes horizontales.

Supposons maintenant que le fil de retour B_1 du second circuit s'éloigne indéfiniment, c'est-à-dire que le second circuit soit constitué par un seul fil B prenant terre aux extrémités ; les distances d_2 et d_4 deviennent égales à la limite et l'équation

$$M = 2l \mathcal{L} \frac{d_2 \, d_3}{d_1 \, d_4}$$

devient

$$M = 2l \mathcal{L} \frac{d_3}{d_1}.$$

On peut d'ailleurs vérifier ce résultat en se reportant aux valeurs partielles M_p de M et cette précaution est utile pour reconnaître si la formule abrégée $M = 2l \mathcal{L} \frac{d_2 \, d_3}{d_1 \, d_4}$ n'est pas altérée dans ce cas particulier.

On reconnaît que si d devient infini M_p est nul, les termes donnés par d_2 et d_4 disparaissent donc ; et il

reste bien

$$M = 2l \mathcal{L} \frac{d_3}{d_1}.$$

Par conséquent pour rendre le coefficient M nul, il faut que $d_3 = d_1$, c'est-à-dire que le fil B soit à égale distance des deux fils A et A_1 du premier circuit. C'est ce qu'on obtient, par exemple, en plaçant B en tête du potelet dans l'axe même, et A et A_1 à égale distance de chaque côté, ou encore plus généralement en posant le circuit A, A_1 en hélice, de manière que les distances moyennes de B à A et A_1 soient égales.

Il est à remarquer que la formule $M = 2l \mathcal{L} \frac{d_3}{d_1}$ est exacte dès que le fil B_1 est supposé assez loin pour que ses distances à A et A_1 puissent être considérées comme égales, et cette condition est bien suffisamment remplie quand le fil B_1 est remplacé par la terre.

Calculons le coefficient d'induction mutuelle entre un fil unique et un circuit double posés sur isolateurs grand modèle à $0^m,40$ de distance (*fig.* 9).

On a

$$d_1 = AB = 0^m,53$$
$$d_3 = A_1B = 0^m,47.$$

Le coefficient kilométrique est

$$M_9 = 460 \log \frac{0,47}{0,53}$$
$$M_9 = 24 \ \mu h.$$

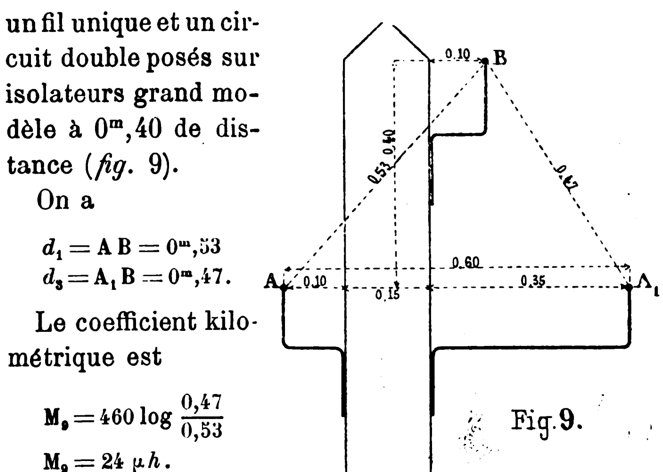


Fig. 9.

Ce coefficient est très faible, et si les deux circuits

sont téléphoniques, il sera inutile de faire tourner le circuit $A A_1$ en hélice, tout au moins sur une longueur d'environ 20 kilomètres.

Cette disposition est meilleure que si le circuit *B* était à double fil, ce qui paraît, *a priori*, extraordinaire.

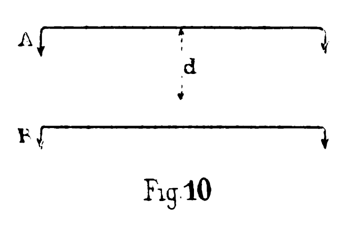


Fig. 10

Considérons maintenant le cas de deux circuits à simple fil (*fig.* 10).

L'intégrale de Neumann doit, comme il a été dit, s'étendre au périmètre des deux circuits A et B.

On est alors réduit à une hypothèse sur le retour par terre.

Supposons que ce retour se fasse par la masse de la terre, à une distance qu'on peut regarder comme infinie, il ne reste alors que le terme relatif à la distance d_1 de A et de B, car dans

$$\int\int \frac{ds\,ds'}{r} \cos \varepsilon, \quad \text{si} \quad r \text{ est } \infty$$

l'intégrale est nulle.

On le voit d'ailleurs aussi sur M_p, comme il a été dit plus haut.

La valeur du coefficient devient, d'après les notations adoptées :

$$M = l \,\pounds\, \frac{2l + \frac{d^2}{2l}}{\frac{d^2}{2l}} - 2\left(l + \frac{d^2}{2l}\right) + 2d$$

et en négligeant $\frac{d^2}{2l}$ par rapport à l

$$M = 2l \,\pounds\, \frac{2l}{d} - 2l + 2d$$

$2d_1$ est pratiquement nul, on peut donc prendre la formule

$$M = 460\, l \left(\log \frac{2l}{d} - 0{,}435\right)$$

l en kilomètres, M en microhenry.

Dans ce cas, M n'est plus proportionnel à l, sans toutefois s'en écarter beaucoup, car pour l assez grand 0,435 est peu important devant $\log \frac{2l}{d_1}$.

Si on considère des fils placés à $0^m,30$, on trouvera pour le coefficient relatif à 1 kilomètre

$$M_{10} = 460 \left(\log \frac{2.000}{0{,}3} - 0{,}435\right) = 1.560\ \mu h.$$

On voit que ce coefficient est notablement supérieur au coefficient obtenu pour le double fil, même lorsque les circuits sont disposés par nappes horizontales.

Pour une longueur de 2 kilomètres, on a

$$M_{11} = 2 \times 460 \left(\log \frac{4.000}{0{,}3} - 0{,}435\right) = 3.400\ \mu h.$$

Le rapport de M_{11} à M_{10} est 2,17 au lieu de 2 si le coefficient variait proportionnellement à la longueur.

Mais pour le calcul précédent on a supposé que le retour se faisait par la terre à une distance pratiquement infinie du fil d'aller.

Cette hypothèse donne la valeur maxima du coefficient, qui serait plus faible, si le retour se faisait à une distance finie.

On peut faire l'hypothèse que le retour se fait par une bande étroite de terre située au-dessous de chaque fil à une distance h, et cette supposition donnera la valeur maxima du coefficient, car le retour ne peut pas se faire plus près ; de sorte qu'on pourra admettre que

sa vraie valeur sera comprise entre les deux formules trouvées dans les deux hypothèses.

Les distances d_1 et d_4 sont égales à d et d_2 et d_3 à h, de sorte que

$$M = 2l \mathcal{L} \frac{\overline{2l}^2}{d^2} \frac{h^2}{\overline{2l}^2} - 4h + 4d$$

ou en négligeant le terme 4 $(d - h)$ si l est suffisamment grand (ce qui est vrai, si l est égal seulement à 1 kilomètre) :

$$M = 4l \mathcal{L} \frac{h}{d}$$

$$M = 920\, l \log \frac{h}{d} \text{ en microhenry.}$$

Si on considère le cas étudié précédemment ou $d = 0^m,30$ et si on suppose les fils à 12 mètres du sol, le coefficient kilométrique sera

$$M_{12} = 920 \log \frac{12}{0,30} = 1.470\ \mu h.$$

On avait trouvé pour M_{10} 1560, on voit que la différence n'est pas très grande et qu'on peut, sans erreur sensible dans la pratique, adopter l'une ou l'autre formule. Le coefficient d'induction relatif au fil simple ne peut qu'être intermédiaire entre ces deux résultats.

Une conséquence intéressante de ces formules, c'est que l'induction n'est pas proportionnelle à la distance ou au carré de la distance des fils. La distance d entrant au contraire sous le signe log, le coefficient M diminue très lentement lorsque d augmente. Prenons par exemple, deux fils simples posés sur les mêmes appuis à $0^m,50$ et deux autres fils simples posés de chaque côté d'une route à 8 mètres de distance.

Les coefficients kilométriques seront :

$$M_{13} = 460 \left(\log \frac{2.000}{0,5} - 0,435\right) = 1.460$$

$$M_{14} = 460 \left(\log \frac{2.000}{8} - 0,435\right) = 900.$$

Le rapport n'est que 1,6 entre ces deux coefficients. Ces calculs justifient ce que l'on savait déjà, que les circuits à double fil sont beaucoup moins gênés, par les effets d'induction mutuelle, que les circuits à simple fil, mais ils montrent qu'ils n'en sont pas exempts. Ils prouvent aussi qu'on doit choisir pour constituer un circuit les fils les plus voisins sur les appuis, condition qui n'est pas réalisée en prenant comme on le fait d'habitude les fils d'une nappe horizontale. Ces calculs ne s'appliquent pas d'ailleurs au cas ou les fils téléphoniques sont très nombreux, car par suite des effets de réaction, l'induction est notablement diminuée. D'après le principe de la conservation de l'énergie, le courant d'induction produit par un circuit inducteur dans un circuit voisin ne peut être emprunté qu'à l'énergie de ce circuit inducteur. Celui-ci se trouve donc modifié par une force contre-électromotrice, et il le sera d'autant plus qu'il y aura plus de courants induits dans le voisinage. Par suite les courants induits dans chaque circuit se trouvent eux-mêmes diminués.

C'est ce qu'on remarque dans les nappes de fils téléphoniques à simple fil avec retour par la terre.

L'induction, qui n'est pas gênante quand il y a beaucoup de fils, serait intolérable s'il n'y avait que deux circuits en présence.

L'expérience pratique sur un certain nombre de circuits téléphoniques (*) a montré qu'avec des fils de

(*) Les chiffres donnés ci-dessous ne résultent pas de mesures exactes

cuivre posés à $0^m,30$, on commençait à entendre un peu d'induction lorsque le coefficient calculé M était égal à 500 microhenry. Quand M = 1000, on commence à comprendre quelques mots et il est déjà utile de faire tourner les circuits à double fil pour égaliser les distances moyennes. A 2000 on peut déjà suivre une conversation en prêtant beaucoup d'attention, et il est presque indispensable d'effectuer les rotations ordinaires. A 5000 les circuits ne sont plus indépendants et on entend très bien sur l'un quand on parle sur l'autre.

Avec l'armement horizontal à $0^m,30$ pour les circuits à double fil, on a trouvé que le coefficient d'induction kilométrique était de 180 microhenry. Il sera donc prudent de faire tourner les fils tous les kilomètres quand les circuits auront 5 kilomètres, car le coefficient sera 900 μh. Toutefois on ne sera gêné réellement qu'à partir de 10 kilomètres.

Pour des circuits à simple fil au contraire armés à $0^m,30$, on comprend quelques mots à partir de 1 kilomètre, car M = 1560, et on peut suivre une conversation à partir de 2 kilomètres (M = 3.400). Pour une longueur de 3 kilomètres (M = 5.350), les deux fils ne peuvent être utilisés en même temps et le simple fil est impraticable à cette distance, pour une ligne à deux circuits, indépendamment de ses autres inconvénients tels que la friture due aux variations des courants venant des terres.

faites par les méthodes connues. Ces mesures sont très délicates et même quelquefois impraticables.

J'ai réuni les cas intéressants d'induction mutuelle que j'ai constatés dans le service courant et j'ai fait, chaque fois, le calcul des coefficients d'induction par les formules données dans cette note. De ces chiffres, j'ai déduit les résultats que j'expose, mais qui ne doivent être considérés que comme des indications pratiques.

L'influence des courants télégraphiques sur les circuits téléphoniques dépend aussi du coefficient M, mais elle est beaucoup plus nuisible.

On sait que la quantité d'électricité induite Q dans un circuit de résistance R, est $\frac{MI}{R}$ lorsque le courant inducteur passe de 0 à I. Mais l'intensité du courant induit est à chaque instant $\frac{M}{R}\frac{dI}{dt}$ et dépend surtout du temps nécessaire à cette variation d'intensité. Ce temps est proportionnel à la self-induction du circuit inducteur, et on sait en effet, qu'en augmentant suffisamment cette self-induction, on arrive à annuler l'effet de la quantité d'électricité produite Q sur le téléphone (système van Rysselberghe par exemple). Si on considère toutefois le cas d'une émission ordinaire de transmission Morse ou Hughes sans interposition d'électro-aimant graduateur, l'expérience pratique sur quelques lignes montre que l'on commence à entendre pour $M = 10$ microhenry. Pour $M = 25$, on peut suivre la transmission avec beaucoup d'attention. Pour $M = 50$, on comprend tous les signaux. Pour $M = 100$, le bruit du Morse ou du Hughes est gênant, et pour $M = 500$, il est intolérable.

Ces coefficients sont très faibles et on peut se reporter aux calculs précédents pour voir qu'on ne peut pas poser une ligne téléphonique à simple fil sur une ligne télégraphique, quelle que soit la longueur. Considérons, en effet, deux fils simples posés à 0m,50 de distance, sur une longueur de 100 mètres seulement, on trouve pour la valeur de M

$$M = 460 \times 0,1 \left(\log \frac{200}{0,5} - 0,435\right) = 100 \text{ microhenry};$$



on entendra toute la transmission et le bruit, sans empêcher entièrement la conversation, fait que le simple fil n'est pas pratique, même pour cette faible distance, si on a un fil télégraphique sur les mêmes appuis.

Le coefficient kilométrique d'induction mutuelle entre un fil simple télégraphique et un circuit double téléphonique placée à $0^{m},30$ avec l'armement le plus favorable de la *fig.* 3 est de 24 microhenry. Dans ce cas, il sera bon de faire tourner les fils téléphoniques à mi-distance, même pour 1 kilomètre, sinon on entendra légèrement la transmission, sans être gêné il est vrai.

Enfin, si on se reporte au calcul des coefficients pour des fils simples situés de chaque côté d'une route, on voit que, même pour 1 kilomètre, on entendra toute la transmission dans un fil téléphonique posé à 8 mètres d'un fil télégraphique. Il ne faut donc pas, dans un cas semblable, construire des lignes spéciales, mais poser un circuit double sur la ligne télégraphique.

On sait d'ailleurs que le circuit à simple fil téléphonique devient de plus en plus difficile à utiliser, en raison des effets d'induction qui se font sentir à une grande distance.

A. Barbarat.

RECHERCHES SUR LES DIÉLECTRIQUES

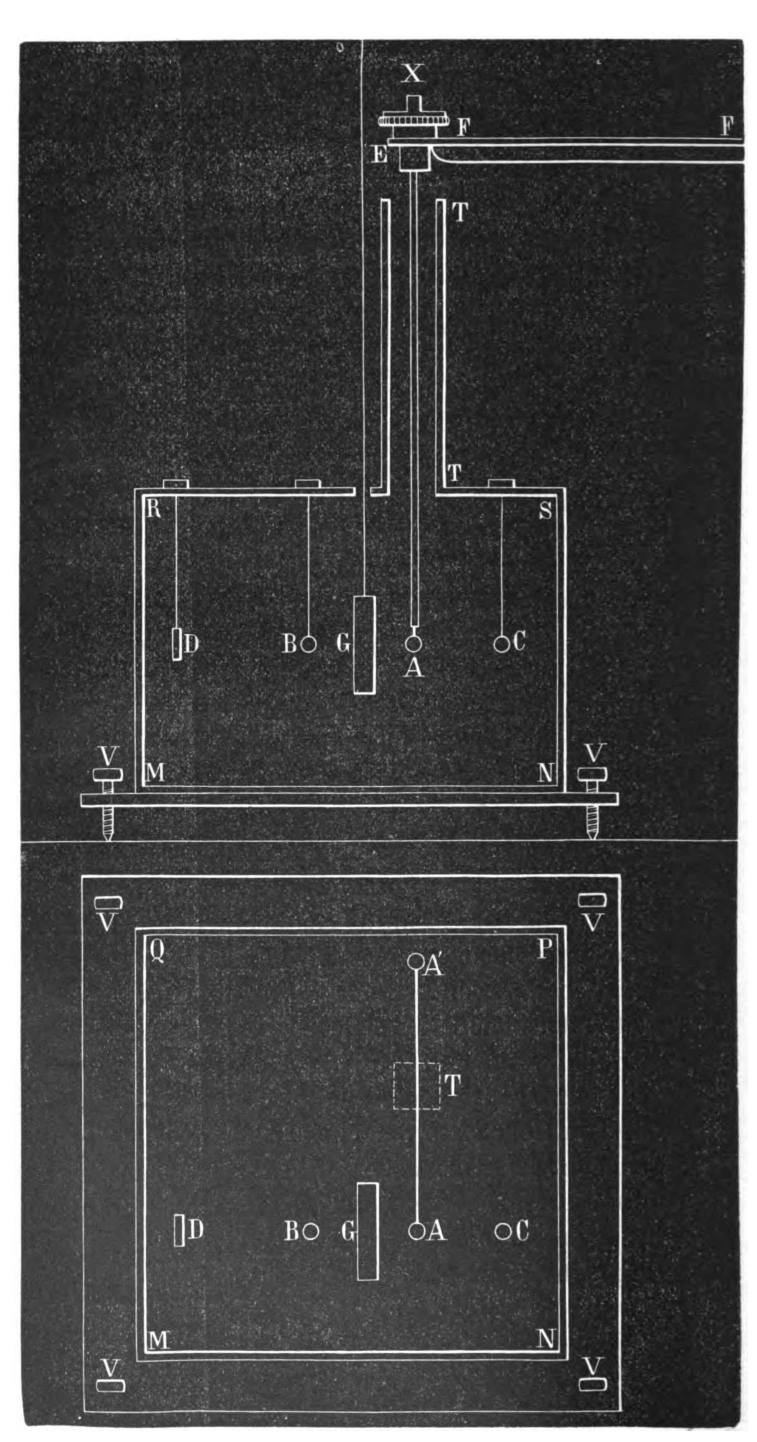
(Suite et fin).

VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES.

Pour soumettre à l'expérience le cas que nous venons d'examiner par le calcul, je me suis servi d'une balance de Coulomb, légèrement modifiée et de grandes dimensions, dont la boule fixe représente le point électrisé. Pour faciliter l'introduction du diélectrique, j'ai adopté la forme carrée; j'ai placé l'aiguille mobile excentriquement et j'ai rendu la boule dite fixe mobile suivant une ligne perpendiculaire à la position d'équilibre de l'aiguille. L'aiguille est portée par un bifilaire.

Description de la balance. — Cette balance de Coulomb, dont la figure montre le plan et l'élévation, est formée d'une grande cage à base carrée MNPQ, de 70 centimètres de côté et de 50 centimètres de hauteur.

L'une des parois verticales MNRS est formée d'une glace à faces parallèles; une autre MQ s'ouvre pour permettre d'introduire les diélectriques. Tout l'intérieur est revêtu d'étain, sauf la partie de la glace à travers laquelle on visse les boules, et cette enveloppe métallique est reliée au sol par l'intermédiaire d'une conduite de gaz. Pour empêcher la production de courants d'air intérieurs, dus aux variations de température, la cage est entourée d'une caisse plus grande remplie d'une couche épaisse de matières peu conductrices;



X
F
F
E
T
T
R
S
D
B
G
A
C
V
V
M
N
V
V
Q
P
A′
T
D
B
G
A
C
M
N
V
V

cette seconde enveloppe, non figurée, est percée en face des deux boules d'une ouverture allongée dans le sens horizontal. Quatre vis calantes VV permettent de régler la position de la cage.

Sur le couvercle est fixé un tube TT vertical, long d'eviron 50 centimètres, dans lequel passe le fil de suspension; ce tube est à base carrée. Deux de ses faces opposées sont formées par deux glaces planes qui peuvent s'enlever. Cette disposition facilite la mise en place du fil de cocon et permet de constater qu'il ne présente aucune torsion. Enfin le tube ainsi constitué n'est pas au centre de l'appareil, mais à 25 centimètres des deux côtés NP et PQ; il se trouve par suite à 45 centimètres de la glace MN. Pour éviter l'influence des trépidations du sol, la tête de torsion X qui supporte l'aiguille n'est pas disposée au sommet du tube; elle est fixée au bout d'une barre de fer horizontale FF, de section en forme de T, scellée dans un mur épais, et terminée par un anneau de même métal. La tête de torsion, semblable à celle des balances ordinaires, est fixée dans une pièce d'ébonite E qui entre exactement dans l'anneau de fer et s'y trouve maintenue par un écrou également isolant. Le fil de cocon est fixé par ses deux extrémités à un petit treuil qui permet de l'allonger ou de le raccourcir à volonté; les deux brins passent ensuite sur un second treuil portant deux pas de vis en sens contraire; en tournant ce treuil dans un sens ou dans l'autre, on fait varier l'écartement des deux fils. Cette partie de l'appareil a été construite par M. Ducretet.

Avant d'employer une suspension bifilaire, j'ai fait de nombreux essais avec des fils d'argent et de laiton de différents diamètres; mais les fils un peu gros

manquaient de sensibilité, et les fils fins donnaient un déplacement continuel du zéro, qui rendait les mesures extrêmement difficiles. Je me suis servi surtout d'un fil d'argent de 1/20 de millimètre de diamètre, avec lequel j'ai pu obtenir quelques résultats. Avant d'être introduit dans la balance, ce fil était recuit soigneusement; pour cela, je le tendais suivant l'axe d'un tube de cuivre rempli de charbon en poudre, et, après l'avoir porté au rouge, je le laissais refroidir lentement; puis je le suspendais verticalement pendant un temps assez long en le tendant par un poids de 30 à 35 grammes. Malgré ces précautions, les fils d'argent m'ont toujours paru subir des changements de zéro très fréquents, et qui persistaient au moins en partie : en général, ils gardaient une partie de la torsion qu'ils avaient reçue. Ayant suspendu un de ces fils dans une position verticale, j'observai que le petit plateau chargé de poids, fixé à la partie inférieure, avait tourné de 90° au bout d'un mois; au bout de trois mois, la rotation était voisine de 180°; puis le fil revint sur lui-même et finit par casser. Ces essais m'ont déterminé à remplacer le fil d'argent par une suspension bifilaire, avec laquelle les déplacements du zéro sont très faibles. Les expériences deviennent ainsi beaucoup plus rapides.

L'aiguille mobile de la balance est formée d'un fil de verre AA′ de 45 centimètres de longueur, enduit de plusieurs couches de gomme-laque. Ce fil traverse une petite pièce d'ébonite, très légère, qui sert à le suspendre, et qui le divise en deux parties inégales. La partie la plus longue, qui a 25 centimètres, se termine par une balle de sureau dorée A de 1,3 centimètre de diamètre; l'autre, qui est un peu plus courte, porte une balle de gomme-laque A′, qui peut se déplacer

légèrement, et qui sert de contrepoids. Un petit miroir plan est fixé au bas de la pièce d'ébonite, normalement à l'aiguille. Dans sa position d'équilibre, l'aiguille est perpendiculaire à la glace plane MN, et la boule dorée se trouve à 20 centimètres de cette glace.

La boule fixe B, de même diamètre que la première, est portée par un fil de verre vertical fixé à une pièce qui glisse dans une rainure pratiquée sur le couvercle, parallèlement à la glace MN. En faisant avancer cette pièce, on fait décrire au centre de la boule fixe une ligne horizontale, parallèle à cette glace, et passant par le centre de la boule mobile, lorsque celle-ci est au zéro. Cette disposition permet de mesurer directement la distance des boules, par la disposition indiquée plus loin.

Les diélectriques G sont placés entre les deux boules; ils se trouvaient, dans les premières expériences, à 6 ou 7 centimètres de la boule mobile; ils ont été placés ensuite à 10 ou 12 centimètres, ce qui n'a rien changé aux résultats. Ils sont suspendus, perpendiculairement à la ligne qui joint les centres des deux boules, par deux fils de soie qui traversent le couvercle de la balance, passent sur des poulies fixées au plafond du laboratoire et s'enroulent sur un treuil fixé au mur.

Dans quelques expériences, les fils de verre portant la boule fixe et les pièces du compensateur, qui sera décrit plus loin, ont été remplacés par des fils de cuivre et celui de l'aiguille mobile par un fil d'aluminium. Ce dernier a dû être abandonné, parce qu'il se courbait avec le temps, et l'aiguille n'oscillait plus aussi facilement.

Emploi d'un compensateur. — J'ai constaté, dès les premiers essais, que les parois de la cage, s'électrisant

par influence, exerçaient sur la boule A des actions notables, dont la résultante était une attraction vers la paroi NPS; pour ramener la boule A au zéro, il fallait une torsion d'environ 120° (fil d'argent). Pour remédier à cet inconvénient, j'ai revêtu tout l'intérieur de la cage d'une couche métallique en communication avec le sol, et j'ai compensé l'attraction des parois par le dispositif suivant.

Après divers essais, j'ai été amené à former ce compensateur de deux boules ou plutôt d'une boule C et d'un disque D isolés, placés en ligne droite avec les deux boules principales et portés au même potentiel. Le disque D est fixé à une pièce glissant dans la même rainure que la boule fixe et placée vers l'extrémité de cette rainure; la boule C est fixée à une pièce glissant dans une rainure creusée sur le prolongement de la première, mais de l'autre côté de la boule mobile. Dans chaque expérience, le compensateur est réglé comme on le verra plus loin. Les deux pièces C et D sont d'abord disposées de façon à maintenir la boule A au zéro en présence du diélectrique, puis, dans la seconde partie de l'expérience, le diélectrique étant supprimé, il faut, pour maintenir la compensation, ou bien déplacer l'une des deux pièces, par exemple la boule C, ou bien, comme je l'ai fait quelquefois, donner au bifilaire une certaine torsion. Le disque D reste immobile pendant toute l'expérience. On conçoit que, si l'une des pièces CD est fixée en un point arbitraire, on peut généralement amener l'autre dans une position telle que la compensation soit réalisée. On peut donc donner au compensateur CD une foule de positions différentes, mais cela n'est pas sans importance; en écartant plus ou moins ces deux pièces, on fait varier la sensibilité

de l'aiguille et aussi la grandeur de l'erreur relative à la loi de Coulomb. Dans certains cas, j'ai donné aux pièces CD l'écartement maximum, afin de disposer d'une course plus grande pour la boule B; dans d'autres, j'ai choisi la position qui permet de se rapprocher le plus de la loi de Coulomb. Le déplacement de la boule compensatrice peut être mesuré grossièrement par une division tracée sur le bord de la rainure correspondante.

Mesure de la distance des boules. — Dans chaque expérience, la boule mobile A est ramenée au zéro en tordant le fil à la partie supérieure : la distance des boules est donc facile à mesurer. J'ai employé pour cela un cathétomètre à tige triangulaire, long de 50 centimètres. Cet appareil, débarrassé de son pied à vis calantes, est fixé horizontalement en face de la glace plane, parallèlement à celle-ci et à une distance d'environ 120 centimètres. En visant avec cet instrument le fil de suspension, je détermine la position d'équilibre de l'aiguille; il suffit de viser ensuite la boule fixe dans chaque position, pour connaître sa distance à la boule mobile. Le cathétomètre porte un vernier au 1/20, ce qui donne une précision plus que suffisante.

Mesure de la torsion. — J'ai dit que l'aiguille A est toujours ramenée au zéro en tordant le fil à sa partie supérieure. L'angle de torsion est mesuré à la manière ordinaire, sur le petit cercle divisé que porte la tête de torsion. Pour vérifier si l'aiguille est exactement au zéro, un viseur est installé en arrière du cathétomètre, à 2 mètres environ de la glace; la règle divisée qui lui correspond est placée immédiatement devant la tige du cathétomètre.

Préparation des diélectriques. — Les expériences

ont porté sur des plaques à faces parallèles de soufre, de paraffine, d'ébonite et de glace de Saint-Gobain, et sur des liquides (sulfure de carbone et essence de térébenthine) contenus dans une cuve de verre à faces parallèles. J'ai employé, outre la paraffine blanche du commerce, un échantillon de paraffine brune, fourni par M. Carpentier, qui considère cette variété comme isolant mieux que la paraffine ordinaire.

Les plaques sont carrées et ont 15 centimètres de côté. Cependant je me suis servi aussi de quelques plaques de paraffine rondes, de 1 centimètre de diamètre, qui ont donné les mêmes résultats. Celles de paraffine et de soufre sont coulées dans un moule formé de quatre plaques de bois réunies par des vis : le fond est une lame de verre. Ce moule, placé sur un support à vis calantes, est rendu horizontal au moyen d'un petit niveau à bulle d'air, posé sur la plaque de verre. Je coule la substance fondue, et, après refroidissement, j'en ajoute une petite quantité pour obvier au retrait, qui est souvent considérable, surtout avec la paraffine. Le moule est démonté; puis je perce dans la plaque deux trous près des bords pour la suspendre, et je l'introduis immédiatement dans la balance.

La surface des plaques d'ébonite était passée au papier de verre et renouvelée avec soin; celle des plaques de glace était lavée et bien nettoyée. Toutes ces plaques étaient ensuite laissées un certain temps, avant d'être employées, dans la balance elle-même ou dans une cage de verre contenant du chlorure de calcium, pour éviter les effets de l'électrisation développée par le frottement. Toutes les plaques sortant de la balance et qui devaient servir de nouveau étaient placées dans la même cage.

Mesure de l'épaisseur des plaques. — L'épaisseur des plaques a été mesurée avec un cathétomètre, après qu'elles eurent servi aux expériences. La plaque est posée sur une lame de verre rodée rendue bien horizontale par un support à vis calantes. Une vis à deux pointes, disposée verticalement au-dessus, est amenée au contact de la face supérieure du diélectrique, puis de la plaque de verre. Je vise dans ces deux positions la pointe supérieure de la vis avec un cathétomètre. Cette disposition rend inutile l'emploi d'une vis bien travaillée. Je fais cette mesure pour cinq points pris dans les diverses régions de la plaque et je prends la moyenne.

Les liquides employés étaient placés dans une cuve de verre à faces parallèles et bien minces, collée avec un mélange de craie et de silicate de potasse. L'épaisseur du liquide a été obtenue de deux manières : j'ai mesuré l'épaisseur extérieure de la cuve par la méthode précédente, et j'en ai retranché l'épaisseur des faces, mesurée sur la cuve décollée; en outre, j'ai mesuré dans cet état l'épaisseur des plaques de verre formant le fond et les parois latérales de la cuve. Ces deux procédés ont donné 3 centimètres.

Électrisation des boules. — La source d'électricité employée est une bobine de Ruhmkorff, alimentée par quatre ou cinq éléments Bunsen et donnant environ 1,5 centimètre d'étincelle. Un galvanomètre à une seule aiguille, placé en dérivation et loin des autres appareils, permet de vérifier la constance du courant inducteur. Un rhéostat, formé d'un fil de platine tendu entre deux bornes isolées, sert à rendre le courant constant, s'il y a lieu, mais le plus souvent cette précaution s'est trouvée inutile, les piles restant constantes pendant

toute une série d'expériences. L'un des pôles de la bobine est en communication permanente avec le sol par une conduite de gaz, l'autre avec un interrupteur formé d'une plaque carrée d'ébonite percée de trois trous remplis de mercure et formant un triangle équilatéral. La bobine est reliée avec l'un de ces trous, la boule fixe B de la balance avec le second, et le troisième reçoit les fils qui aboutissent à la boule mobile A et aux deux pièces CD du compensateur. En réunissant le premier trou avec le troisième par un petit pont en fil de cuivre, je charge seulement A et CD, pour le réglage du compensateur; en le réunissant avec le second et le troisième, je charge toutes les pièces pour les expériences.

Toutes les communications sont établies par des fils de cuivre très fins, recouverts de soie blanche, et suspendus au plafond par des fils de soie. Ces fils de cuivre pénètrent dans la balance en passant dans des tubes d'ébonite fixés sur le couvercle, qui servent à éviter les étincelles. Celui qui est destiné à la boule mobile se rend à un petit cristallisoir rempli de potasse concentrée et posé sur un bloc d'ébonite, exactement au-dessous du fil de suspension. Dans ce liquide plonge un autre fil fin, qui monte verticalement jusqu'à l'aiguille, s'enroule autour du fil de verre et aboutit à la boule mobile. Les autres fils se rendent directement à la boule fixe et aux deux parties du compensateur; ils ont une longueur suffisante pour permettre le libre jeu de ces trois pièces. Dans l'intervalle des expériences, toutes les parties de l'appareil sont mises en communication avec le sol par l'intermédiaire de l'interrupteur.

Marche des expériences. — Le diélectrique est introduit dans la balance, suspendu aux fils de soie et réglé

bien verticalement; je place aussi dans l'appareil un petit vase de métal contenant du chlorure de calcium. La balance est refermée et abandonnée à elle-même pendant deux ou trois jours au moins, afin d'éviter l'électrisation produite par la manipulation du diélectrique. Après ce temps, je vérifie si l'aiguille est exactement au zéro, je soulève le diélectrique, au moyen du treuil qui le commande, de manière à l'amener à la hauteur des deux boules. Je fais alors communiquer la bobine de Ruhmkorff avec l'aiguille et les deux pièces du compensateur, mais non avec la boule fixe, et je dispose le compensateur de façon à ramener l'aiguille au zéro. Je relie enfin la boule fixe à la bobine, et je la rapproche ou l'éloigne de la boule mobile, en mesurant dans chaque position la distance des deux balles et la torsion correspondante. Le zéro est vérifié de temps en temps.

Pour déterminer la répulsion des deux boules en l'absence du diélectrique, il ne suffit pas d'abaisser celui-ci jusqu'au fond de la cage : il exercerait encore une action notable; il faut donc l'enlever complètement, ce que je fais immédiatement après la première série d'expériences. Je referme l'appareil et j'attends au lendemain pour déterminer la répulsion sans le diélectrique. Cette seconde série de mesures se fait comme la première; mais, après avoir vérifié si l'aiguille est au zéro, et chargé le compensateur et la boule mobile, il faut, pour maintenir cette dernière au zéro, déplacer la boule compensatrice d'une certaine quantité; le sens de ce déplacement paraît dépendre de la position du compensateur. Le plus souvent, il a fallu rapprocher la boule; quelquefois, lorsque les deux pièces du compensateur étaient plus écartées, il a fallu

au contraire l'éloigner. Ce déplacement opéré, on procède à la seconde série de mesures.

Enfin, dans quelques expériences, on n'a pas déplacé du tout le compensateur, et l'on a corrigé l'effet de l'introduction du diélectrique en donnant au bifilaire une torsion préalable. Les résultats n'ont pas été changés.

Corrections. — Avant d'indiquer les résultats obtenus, je dois faire remarquer que les nombres observés ont dû subir deux corrections.

J'ai cherché d'abord si, dans chaque expérience, la force répulsive est bien représentée par le sinus de l'angle de torsion du bifilaire. Pour cela, j'ai fixé, au bas de la petite pièce d'ébonite qui forme le milieu de l'aiguille mobile et qui porte le miroir, un fil d'argent de 1/20 de millimètre de diamètre et d'environ 25 centimètres de longueur. Ce fil, recuit avec les précautions indiquées plus haut, était tendu à la partie inférieure par une petite pince portant un index, et placée au-dessus d'un cercle divisé mobile.

Le système mobile étant bien en équilibre sans torsion, je cale l'index inférieur sur le cercle divisé, de façon à empêcher cet index de tourner, tout en lui permettant un déplacement vertical. Je tourne ensuite le cercle divisé inférieur, dont la rotation est mesurée par un index fixe; cette opération tord le fil d'argent, et je ramène l'aiguille au zéro en tordant le bifilaire en sens contraire.

De nombreuses expériences, dans lesquelles j'ai fait varier progressivement le poids de la pince inférieure jusqu'à la charge limite que peut porter le bifilaire, ont montré que celui-ci ne suit jamais exactement la loi du sinus. En effet, si l'on construit une courbe

ayant pour abscisse le sinus de la déviation du bifilaire et pour ordonnée la déviation du fil d'argent, cette courbe, qui devrait être une droite passant par l'origine, présente d'abord, à partir de ce point, une légère convexité vers l'axe des x, avant de devenir une droite. Les résultats sont les mêmes, quelle que soit la charge supportée par le bifilaire, et quel que soit le sens de la déviation. J'ai choisi les deux expériences suivantes, qui sont bien concordantes, et qui ont été faites en donnant à tout l'appareil mobile un poids sensiblement égal à celui que présentait l'aiguille dans les expériences sur les diélectriques.

Torsion du			
Bifilaire.	Fil d'argent.	Bifilaire.	Fil d'argent.
7,5	6	7,5	5,5
15	10,5	15	11
30	21,5	22,5	15
45	32	37,5	25
60	44	52,5	37
75	57	67,5	49,5
90	81,5	82,5	67,5
82,5	67	90	91
67,5	51	75	58
52,5	38	60	43,5
37,5	26	45	31
22,5	15,5	30	20

A l'aide de ces deux séries d'expériences, j'ai construit deux courbes ayant pour ordonnées les torsions du fil d'argent et pour abscisses, l'une les déviations du bifilaire, l'autre les sinus de ces déviations. J'ai pu dresser ainsi une table de correction, qui m'a permis de remplacer, dans toutes les expériences, la déviation observée par la force répulsive correspondante, exprimée en degrés de torsion du fil d'argent.

D'autre part, j'ai calculé l'influence réciproque des

deux boules par la méthode des images électriques (*).

Les deux boules de rayon R étant supposées au potentiel 1, et leurs centres à une distance d l'un de l'autre, l'action exercée sur la boule mobile se compose des forces suivantes :

1° Au centre :

$$+\frac{R^2}{d^2}-\frac{R^3 d}{(d^2-R^2)^2}+\frac{R^4(d^2-R^2)}{d^2(d^2-2R^2)^2}-\frac{R^5 d(d^2-2R^2)}{(d^4-3d^2R^2+R^4)^2}+\cdots$$

2° A une distance $\frac{R^2}{d}$ du centre :

$$-\frac{R^3 d}{(d^2-R^2)^2}+\frac{R^4}{(d^2-2R^2)^2}-\frac{R^5 d(d^2-R^2)}{(d^4-3d^2R^2+R^4)^2}+\cdots$$

3° A une distance $\frac{R^2 d}{d^2-R^2}$ du centre :

$$+\frac{R^4(d^2-R^2)}{d^2(d^2-2R^2)^2}-\frac{R^5 d(d^2-R^2)}{(d^4-3d^2R^2+R^4)^2}+\cdots$$

4° A une distance $\frac{R^2}{d}\,\frac{d^2-R^2}{d^2-2R^2}$:

$$-\frac{R^5 d(d^2-2R^2)}{(d^4-3d^2R^2+R^4)^2}+\cdots$$

Pour avoir l'action totale, il suffit d'additionner toutes ces forces. J'ai donc calculé les valeurs de cette résultante pour différentes distances des deux boules, ainsi que la force $\frac{R^2}{d^2}$, qui s'exercerait s'il n'y avait pas d'influence. En divisant la valeur de la première force par celle de la seconde, on obtient le rapport dans lequel la répulsion se trouve diminuée par l'influence, pour une distance déterminée. Il suffit donc de multi-

(*) Pellat, *Leçons sur l'électricité*, p. 387.

plier la répulsion observée par le rapport inverse, soit S, pour corriger l'effet de l'influence.

Mais il est plus simple, au lieu de corriger les torsions observées, de faire porter la correction sur la distance, ce qui permet de la calculer une fois pour toutes. La masse des boules étant diminuée par l'effet de l'influence, on peut obtenir le même résultat en supposant les masses électriques constantes et en augmentant la distance des centres. Il est évident qu'il suffit de multiplier la distance par $\sqrt{S}$.

Le tableau suivant donne, pour diverses valeurs de d, le rapport S par lequel il faudrait multiplier les torsions, le rapport $\sqrt{S}$, par lequel j'ai multiplié les distances, enfin les distances d' ainsi corrigées, le rayon R des sphères étant égal à $0,65^{cm}$.

d	S	$\sqrt{S}$	d	d	S	$\sqrt{S}$	d'
7	1,1981	1,0947	7,663	16	1,0832	1,0408	16,652
8	1,1718	1,0825	8,660	17	1,0782	1,0383	17,652
9	1,1515	1,0730	9,658	18	1,0737	1,0362	18,651
10	1,1353	1,0655	10,655	19	1,0697	1,0343	19,651
11	1,1227	1,0596	11,655	20	1,0661	1,0325	20,651
12	1,1120	1,0545	12,654	22	1,0601	1,0296	22,651
13	1,1030	1,0503	13,653	25	1,0527	1,0260	25,650
14	1,0954	1,0466	14,653	27	1,0487	1,0241	27,650
15	1,0889	1,0435	15,652	30	1,0438	1,0217	30,650

On voit que cette correction consiste à ajouter à toutes les distances une quantité sensiblement constante et qui, dans ce cas, est à peu près égale au rayon des boules. J'ai ajouté 0,66 aux distances comprises entre 7 et 10 centimètres, et 0,65 à toutes les distances plus grandes.

Une correction analogue devrait être faite pour l'influence des deux pièces du compensateur sur la boule fixe. Dans le cas où cet appareil était formé de

deux boules, j'ai calculé, pour diverses positions, l'influence de celle qui se trouvait en arrière de la boule fixe, et par conséquent la plus rapprochée d'elle, et j'ai constaté qu'elle pouvait être négligée. L'influence de l'autre boule compensatrice est encore plus faible, puisqu'elle est plus éloignée. Enfin, il n'y a pas à s'inquiéter de l'influence du compensateur sur l'aiguille mobile, puisque le réglage est fait de telle sorte que les actions du compensateur et des parois sur cette aiguille s'annulent. Le compensateur ne donne donc lieu à aucune correction.

Enfin, malgré les deux corrections précédentes, qui d'ailleurs n'ont modifié en rien les résultats de mes expériences, les nombres obtenus tout d'abord, sans l'interposition d'un diélectrique, ne suivaient pas la loi de Coulomb, comme ils auraient dû le faire. Le produit C du carré de la distance par la force répulsive, au lieu d'être constant, augmentait notablement avec la distance.

Ce désaccord ne peut s'expliquer que par l'influence de la charge électrique des parois de la balance. Lorsqu'on électrise la boule fixe, après avoir réglé le compensateur, la charge des parois augmente ; lorsqu'on déplace cette boule, la distribution des masses situées sur les parois se modifie. Ces changements de distribution peuvent à leur tour faire varier la capacité des pièces situées dans l'intérieur. De là autant de causes d'erreur qu'on ne peut ni corriger ni éviter, puisqu'on ne peut employer une balance assez grande pour n'avoir pas à se préoccuper des parois.

L'explication qui précède est appuyée par ce fait que tout changement dans la disposition des parois ou du compensateur modifie notablement la valeur du désac-

cord avec la loi de Coulomb et peut même en changer le sens. Ainsi, j'ai fait quelques expériences en divisant la cage de la balance en deux parties à peu près égales par une cloison métallique verticale, perpendiculaire à la position de repos de l'aiguille mobile; l'extrémité de cette aiguille traversait une fenêtre allongée percée dans la cloison. Cette disposition avait été essayée pour séparer les pièces isolantes (suspension de l'aiguille, cuve de potasse, support d'ébonite). Le compartiment où se faisaient les expériences ne renfermaient alors que des pièces métalliques, savoir les deux boules principales et une seule boule compensatrice, placée du côté opposé à la boule fixe. Dans ce cas, l'erreur était changée de signe; le produit C variait très fortement, mais en sens contraire de la distance. De plus, les déviations observées étaient beaucoup plus fortes que dans la disposition ordinaire : la capacité des boules était donc notablement augmentée. L'emploi de la cloison médiane a été abandonné.

D'un autre côté, j'ai été amené, après bien des essais, à observer que la valeur et le sens de l'erreur peuvent être modifiés en déplaçant le compensateur. La boule compensatrice étant à environ — $12{,}5^{cm}$ de l'aiguille mobile et le disque compensateur dans la position correspondante, c'est-à-dire à peu près à + 25 centimètres, le produit C diminue sensiblement dans le rapport de 1 à 2, lorsque la distance d diminue de 20 à 7 centimètres. Si au contraire on écarte beaucoup plus les deux pièces du compensateur, ce produit passe par un maximum lorsque la distance d diminue. Dans le premier cas, il faut, lorsqu'on introduit le diélectrique, éloigner la boule compensatrice du zéro

(exp. I); dans le second cas, il faut au contraire la rapprocher (exp. VIII). Il semble donc qu'il y ait une position intermédiaire du compensateur pour laquelle le produit C reste constant, et que, pour cette position, le réglage subsiste avec ou sans diélectrique.

Un certain nombre d'expériences, telles que XI et XII, ont été exécutées dans cette position ou dans son voisinage immédiat; la variation du produit C n'y est pas supérieure aux erreurs d'expérience, si ce n'est pour un ou deux nombres de chaque série, qui sont du reste entachés de fortes erreurs d'expérience, ainsi que le montre l'examen des courbes correspondantes.

D'ailleurs, quels que soient la disposition intérieure de la balance et l'écartement des pièces du compensateur, quels que soient le sens et la grandeur de l'erreur relative à la loi de Coulomb, j'ai toujours obtenu les mêmes résultats. On peut donc conclure que ces différentes causes n'ont pas d'influence sur les résultats.

On pouvait du reste prévoir qu'il en serait ainsi, mes recherches ayant seulement pour but d'observer la différence produite dans l'action répulsive par l'introduction d'un diélectrique.

Enfin, dans le plus grand nombre des expériences, la boule compensatrice a occupé une place différente suivant que le diélectrique était interposé ou enlevé. On peut objecter que ce déplacement de la boule compensatrice modifie l'influence des parois, qui ne serait plus la même dans les deux parties de l'expérience. D'où une cause d'erreur qui empêcherait d'apprécier exactement l'effet produit par l'introduction du diélectrique. Mais il est à remarquer que, dans les expériences XI et XII, ce déplacement a été seulement de

$0,2^{cm}$ et de $0,6^{cm}$; dans d'autres cas, je n'ai pas déplacé la boule compensatrice, et j'ai compensé l'introduction du diélectrique en donnant une torsion préalable au bifilaire. Toutes ces expériences donnant des résultats parfaitement concordants, la cause d'erreur que je viens de signaler n'a aucun effet appréciable.

Résultats. — Les expériences ont porté sur plus de vingt plaques solides, formées de paraffine blanche ou brune, d'ébonite, de soufre et de glace de Saint-Gobain, ainsi que sur deux liquides, le sulfure de carbone et l'essence de térébenthine. Tous les résultats étaient concordants, mais j'ai gardé seulement ceux qui m'ont paru les meilleurs. Pour faire ce choix, j'ai d'abord calculé, pour toutes les expériences faites sans diélectrique, le produit αd^2 de la torsion corrigée par le carré de la distance corrigée, produit qui, d'après la loi de Coulomb, doit être constant, et j'ai éliminé celles pour lesquelles j'ai constaté des écarts trop nombreux et trop considérables.

La loi de Coulomb ne m'a cependant pas paru constituer un critérium suffisant, et j'ai éliminé aussi les expériences pour lesquelles les courbes dont il sera question plus loin ne pouvaient pas être construites avec assez de certitude. En résumé, j'ai donc gardé les seules séries dont la plupart des nombres se prêtent bien à la construction d'une courbe et ne présentent pas avec la loi de Coulomb un écart sensiblement supérieur au 1/10 de la valeur moyenne des produits αd^2.

Il faut remarquer cependant qu'il se trouve dans la plupart des expériences un ou deux points qui s'écartent notablement des courbes et qui semblent par suite entachés de fortes erreurs d'expérience. Ces écarts

fortuits me paraissent faciles à comprendre avec un appareil aussi délicat que la balance de Coulomb et présentant des dimensions aussi grandes que celui qui m'a servi. Le moindre courant d'air intérieur suffit pour altérer complètement le résultat d'une mesure. J'ai cru devoir conserver les nombres qui présentent ce défaut, pour montrer la sincérité complète des expériences, mais je les ai marqués d'un astérique, dans les tableaux suivants, qui contiennent les résultats que j'ai retenus.

La première colonne de ces tableaux donne la distance d' observée des centres des deux boules, la seconde indique cette même distance d corrigée de l'influence, la troisième fait connaître la torsion observée α' ou β' et la quatrième contient la torsion correspondante α ou β du fil d'argent, c'est-à-dire la valeur exacte de la répulsion. Enfin j'ai indiqué pour chaque expérience l'épaisseur e de la lame employée, la distance c de la boule compensatrice au zéro en l'absence du diélectrique et cette même distance c' quand le diélectrique était interposé.

Expérience I. — **Paraffine brune.**

$e = 3{,}54 \quad c = 13{,}5 \quad c' = 19{,}3$

I. — *Avec le diélectrique.*				II. — *Sans le diélectrique.*			
d'	d	β'	β	d'	d	α'	α
*22,40	23,05	12	17	17,43	18,08	14	20
*19,17	19,85	16	23	12,93	13,58	25	36,5
17,38	18,03	17	25	10,56	11,21	34	48,5
15,18	15,83	23	33,5	9,68	10,34	37,5	53
13,29	13,94	29	42	8,53	9,19	51,5	69
12,18	12,83	34	48,5				
11,28	11,93	39,5	55,5				
10,33	10,91	48	65				

Expérience II. — **Paraffine blanche.**

$e = 3,90 \quad c = 13,7 \quad c' = 15,6$

I. — *Avec le diélectrique.*

d'	d	β'	β
18,96	19,61	12	17
16,97	17,62	15	22
15,98	16,63	17,5	25,5
15,30	15,95	19	27,5
14,30	14,95	21,5	31
12,80	13,45	25,5	37
11,74	12,39	29,5	42,5
10,67	11,32	31,5	45,5

II. — *Sans le diélectrique.*

d'	d	α'	α
17,33	17,98	11,5	16
•15,61	16,26	13,5	19
14,24	14,89	16,5	24
•12,82	13,47	18	26
12,03	12,68	21,5	31
10,90	11,55	24,5	35,5
9,78	10,44	28	40,5
9,22	9,88	30	43,5
8,16	8,82	38	53,5

Expérience III. — **Ébonite, n° 1.**

$e = 2,72 \quad c = 13,5 \quad c' = 16,8$

I. — *Avec le diélectrique.*

d'	d	β'	β
19,99	20,64	16	23
17,40	18,05	21	30,5
15,17	15,82	26	37,5
13,26	13,91	33	47
10,67	11,32	46,5	63,5
	Autre série.		
19,15	19,80	16,5	24
16,52	17,17	22	32
14,72	15,37	26	37,5
12,86	13,51	34,5	49
12,06	12,71	39	55
10,77	11,42	46	63
10,00	10,65	53	70,5
9,39	10,05	57	74,5

II. — *Sans le diélectrique.*

d'	d	α'	α
15,72	16,37	20	29,5
•13,17	13,82	29	42
10,93	11,58	37	52,5
10,03	10,68	40	56
9,01	9,67	47	64
7,93	8,59	9	76

Expérience IV. — **Ébonite, n° 2.**

$e = 2,12 \quad c = 15 \quad c' = 15,9$

I. — *Avec le diélectrique.*

d'	d	β'	β
18,60	19,25	15,5	22,5
16,19	16,84	21	30,5
13,52	14,17	28,5	41
12,60	13,25	35,5	50,5
11,40	12,05	37,5	53
10,18	10,83	48	65
• 9,34	10,00	51	68,5

II. — *Sans le diélectrique.*

d'	d	α'	α
16,49	17,14	16	23
14,35	15,00	24	34,5
12,83	13,48	28	40,5
11,97	12,62	32	46
10,50	11,15	37,5	53
9,24	9,90	42	58
8,88	9,54	50	67,5
7,93	8,59	56	73,5

Expérience V. — Glace de Saint-Gobain, n° 1.

$e = 1,73 \quad c = 13,5 \quad c' = 16,6$

I. — *Avec le diélectrique.*				II. — *Sans le diélectrique.*			
d'	d	β'	β	d'	d	α'	α
18,40	19,05	16	23	18,72	19,37	13	18,5
16,76	17,41	18,5	27	17,20	17,85	14,5	21
14,98	15,63	23	33,5	14,90	15,55	19,5	28,5
13,37	14,02	26,5	38,5	12,01	12,66	27	39,5
12,20	12,85	30,5	44	•10,83	11,48	28	40,5
10,96	11,61	34,5	49	9,67	10,33	35	50
9,96	10,62	40	56	8,64	9,30	40	56
9,13	9,79	46	63	7,24	7,90	53	70,5

Expérience VI. — Glace, n° 2.

$e = 2,50 \quad c = 14,8 \quad c' = 19,3$

I. — *Avec le diélectrique.*				II. — *Sans le diélectrique.*			
d'	d	β'	β	d'	d	α'	α
17,72	18,37	15	22	16,08	16,73	14,5	21
17,47	18,12	15,5	22,5	13,54	14,19	18,5	27
15,51	16,16	17	25	11,48	12,13	24	34,5
15,48	16,13	18,5	27	10,26	10,91	28	40,5
13,22	13,87	23,5	34	9,17	9,83	31	45
•11,33	11,98	25,5	37	7,68	8,34	39,5	45,5
10,48	11,13	31,5	45,5				
10,04	10,69	33,5	48				
9,24	9,90	39,5	55,5				

Expérience VII. — Soufre, n° 1.

$e = 2,87 \quad c = 14,2 \quad c' = 17$

I. — *Avec le diélectrique.*				II. — *Sans le diélectrique.*			
d'	d	β'	β	d'	d	α'	α
18,40	19,05	10	14	•16,24	16,89	8	11
16,50	17,15	12	17	•14,80	15,45	9,5	13
13,59	14,24	17,5	25,5	13,35	14,00	14	20
11,41	12,06	21,5	31	12,30	12,95	15	22
10,72	11,37	25,5	37	11,12	11,77	18	26
10,37	11,02	28,5	41	9,89	10,55	20,5	30
				8,43	9,09	27	39,5

Expérience VIII. — **Soufre, n° 2.**

$e = 4,50 \quad c = 13,5 \quad c' = 22,2$

I. — *Avec le diélectrique.*				II. — *Sans le diélectrique.*			
d'	d	β'	β	d'	d	α'	α
•19,34	19,99	21	30,5	16,38	17,03	18,5	27
•16,78	17,43	26,5	38,5	15,71	16,36	20,5	30
14,42	15,07	31	45	13,22	13,87	25,5	37
12,43	13,08	39,5	55,5	11,95	12,60	28,5	41
11,25	11,90	47	64	11,03	11,68	32,5	46,5
13,50	14,15	34,5	49	9,92	10,58	37,5	53
15,43	16,08	28,5	41	8,89	9,55	42	58
17,47	18,12	22,5	33	8,17	8,83	47,5	64,5
19,35	20,00	18,5	27	7,50	8,16	51,5	69
•21,00	21,65	13	18,5				

Expérience IX. — **Soufre, n° 3.**

(Suspension unifilaire en fil d'argent.)

$e = 3,60$

I. — *Avec le diélectrique.*			II. — *Sans le diélectrique.*		
d'	d	β	d'	d	α
•21,32	21,97	45	•21,65	22,30	42
20,16	20,81	61	20,01	20,66	45
18,40	19,05	70	18,23	18,88	57
18,28	18,93	74	17,02	17,67	65
16,41	17,06	89	16,68	17,33	68
15,97	16,62	98	16,10	16,75	76
14,99	15,64	106	14,92	15,65	85,5
13,86	14,51	127	13,67	14,32	97
13,04	13,69	137	12,95	13,60	104,5
11,85	12,50	164	11,85	12,50	122
11,04	11,69	191	10,43	11,08	146
			9,65	10,31	166
			8,58	9,24	213

Expérience X. — **Soufre, n° 4.**

(Plaque fondue depuis six mois.)

$e = 2,46 \quad c = 13,5 \quad c' = 17,1$

I. — *Avec le diélectrique.*				II. — *Sans le diélectrique.*			
d'	d	β'	β	d'	d	α'	α
23,37	24,02	17	25	23,21	23,86	16	23
20,33	20,98	23	33,5	19,09	19,74	22	31,5
•18,07	18,72	26	37,5	17,21	17,86	26	37,5
15,47	16,12	40	56	13,54	14,19	39	55
13,67	14,32	48	65	12,31	12,96	45	61,5
11,85	12,50	60	77	•10,35	11,00	52	69,5
10,07	10,72	89	91	9,00	9,66	68	83,5
				8,11	8,77	83	90

Expérience XI. — **Essence de térébenthine.**

$e = 3{,}00 \quad c = 20 \quad c' = 19{,}8$

I. — *Avec le diélectrique.*				II. — *Sans le diélectrique.*			
d'	d	β'	β	d'	d	α'	α
30,92	31,57	7	9	29,09	29,74	7,5	10
29,52	30,17	8,5	12	25,35	26,00	13	18,5
26,91	27,56	12	17	23,47	24,12	16,5	24
24,56	25,21	16,5	24	21,39	22,04	20	29,5
20,74	21,39	26	37,5	19,53	20,18	25,5	37
19,04	19,69	28,5	41	18,10	18,75	29	42
*17,68	18,33	30,5	44	16,30	16,95	33,5	48
16,41	17,06	36,5	51,5				

Expérience XII. — **Sulfure de carbone.**

$e = 3{,}00 \quad c = 18{,}9 \quad c' = 19{,}5$

I. — *Avec le diélectrique.*				II. — *Sans le diélectrique.*			
d'	d	β'	β	d'	d	α'	α
*30,37	31,02	13	18,5	27,40	28,05	13,5	19
*27,66	28.31	17	25	24,98	25,63	16,5	24
25,73	26,38	19	27,5	22,58	23,23	21,5	31
23,88	24,53	22	32	20,45	21,10	26	37,5
*22,33	22,98	27	39,5	18,54	19,19	31	45
19,64	20,29	31	45	16,92	17,57	37	52,5
18,40	19,05	36	51				
17.41	18,06	42	58				
15,99	16.64	51	68,5				

Discussion des expériences. — Les tableaux qui précèdent montrent immédiatement que l'interposition d'une lame diélectrique à faces parallèles a pour effet d'augmenter la répulsion des deux boules. Pour interpréter plus complètement ce résultat, je construis pour chaque expérience deux courbes ayant pour abscisses les distances corrigées d et pour ordonnées les forces répulsives β et α avec ou sans le diélectrique.

En comparant ces courbes, qui sont toutes deux de forme hyperbolique, il m'a paru qu'elles sont identiques et que la seconde peut se déduire de la première en diminuant toutes les abscisses d'une même quantité δ, constante pour une même plaque et proportionnelle

à son épaisseur e, sans modifier la valeur des ordonnées. L'interposition du diélectrique produirait donc, au moins dans les limites de mes expériences, le même effet que si l'on rapprochait les boules de la distance δ. Comme d'ailleurs δ dépend de la nature de la plaque, je poserai

$$\delta = e f(k).$$

J'ai mesuré, pour toutes les expériences, la valeur de δ sur les courbes elles-mêmes, dont la distance horizontale est toujours bien uniforme, au moins dans la plus grande partie de leur longueur. Les extrémités seules sont quelquefois mal déterminées, surtout à la partie inférieure, qui correspond aux grandes distances et aux faibles torsions.

Pour avoir plus d'exactitude, j'ai construit pour chaque expérience deux courbes à des échelles différentes ; dans la seconde, j'ai doublé l'unité prise pour les ordonnées sans modifier celle des abscisses. Le tableau suivant donne les valeurs δ_1 et δ_2 déduites de ces deux séries de courbes, et leur moyenne δ, ainsi que les valeurs de $f(k) = \frac{\delta}{e}$:

SUBSTANCES.	e	δ_1	δ_2	δ	$f(k)$
I. Paraffine brune	3,54	1,80	1,75	1,775	0,50
II. Paraffine blanche	3,90	2,10	2,20	2,15	0,55
III. Ebonite n° 1	2,72	1,50	1,50	1,50	0,55
IV. Ebonite n° 2	2,12	1,30	1,25	1,275	0,60
V. Glace de Saint-Gobain n° 1	1,73	1,20	1,20	1,20	0,69
VI. Glace de Saint-Gobain n° 2	2,50	1,40	1,40	1,40	0,56
VII. Soufre n° 1	2,87	1,85	1,80	1,825	0,63
VIII. Soufre n° 2	4,50	3,00	3,00	3,00	0,66
IX. Soufre n° 3	3,60	2,10	2,10	2,10	0,58
X. Soufre (fondu depuis six mois) n° 4	2,46	1,80	1,80	1,80	0,73
XI. Essence de térébenthine	3,00	1,10	1,10	1,10	0,37
XII. Sulfure de carbone	3,00	1,25	1,30	1,275	0,42

Il reste à déterminer la forme qui convient le mieux pour $f(k)$. J'ai essayé les formes empiriques suivantes :

$$(1) \qquad \frac{k-1}{2},$$

$$(2) \qquad \frac{k-1}{k},$$

$$(3) \qquad \frac{3}{2}\frac{k-1}{k+1},$$

$$(4) \qquad 2\frac{k-1}{k+2},$$

qui donnent des résultats identiques pour $k=1$ et $k=2$. Voici les valeurs que donnent ces quatre formules :

	SUBSTANCES	k_1	k_2	k_3	k_4
I.	Paraffine brune	2,00	2,00	2,00	2,00
II.	Paraffine blanche	2,10	2,22	2,15	2,13
III.	Ebonite n° 1	2,10	2,22	2,15	2,13
IV.	Ebonite n° 2	2,20	2,50	2,33	2,28
V.	Glace n° 1	2,38	3,22	2,70	2,58
VI.	Glace n° 2	2,12	2,27	2,19	2,16
VII.	Soufre n° 1	2,26	2,70	2,44	2,38
VIII.	Soufre n° 2	2,32	2,94	2,57	2,47
IX.	Soufre n° 3	2,16	2,38	2,26	2,22
X.	Soufre (fondu depuis six mois) n° 4	2,46	3,70	2,89	2,72
XI.	Essence de térébenthine	1,74	1,58	1,65	1,68
XII.	Sulfure de carbone	1,84	1,72	1,77	1,79

On voit que ces quatre formules donnent des nombres à peu près identiques ; on pourrait en construire de même beaucoup d'autres qui auraient la même propriété, à la condition de leur donner, comme nous l'avons fait pour les expressions 1, 3 et 4, un coefficient numérique arbitraire.

Parmi les quatre formules essayées, la première a l'avantage de donner les résultats les plus concordants pour les plaques de même espèce ; je trouve même qu'on peut lui reprocher de manquer de sensibilité,

car elle donne pour les six substances employées des constantes comprises entre 2,46 et 1,74, par conséquent trop rapprochées à mon avis ; pour le soufre, elle donne une moyenne de 2,3, nombre sensiblement inférieur à ceux de Gordon.

La seconde formule est au contraire la plus sensible ; la moindre différence sur la grandeur de δ change notablement la valeur de k. Aussi présente-t-elle deux défauts de concordance qu'on n'observe pas dans les autres, l'un pour les deux glaces de Saint-Gobain, l'autre pour la plaque de soufre n° 4, qui ne s'accorde pas avec les trois autres ; mais c'est une plaque qui était fondue depuis plus de six mois lorsque je l'ai employée, tandis que les autres ont été introduites dans l'appareil aussitôt après leur fabrication. J'ai d'ailleurs obtenu la même différence dans les mêmes conditions avec d'autres plaques non indiquées ici. Or on sait que M. Gordon a observé que le pouvoir inducteur du verre augmente notablement avec le temps ; il n'est pas surprenant qu'il en soit de même pour le soufre (*).

Le cas des deux glaces de Saint-Gobain peut s'expliquer soit par la même raison, soit par une différence de composition ; rien ne me garantit qu'elles soient formées de verre identique.

Les deux défauts de concordance offerts par la formule (2) sont donc facilement explicables. D'un autre côté, elle a l'avantage de donner pour δ une expression analogue à celle qu'on obtient dans les condensateurs.

(*) Des expériences récentes, que je ferai connaître prochainement, et qui ont été faites par une méthode entièrement différente, m'ont prouvé que la constante diélectrique du soufre augmente bien avec le temps et dans une proportion très notable.



On a en effet :

$$\delta = e\left(1 - \frac{1}{k}\right).$$

On voit donc que, si on admet cette formule, l'introduction du diélectrique produit, au moins dans les limites de mes expériences, le même effet que si l'on rapprochait les deux boules de $e\left(1 - \frac{1}{k}\right)$, ou si l'on remplaçait le diélectrique par une épaisseur d'air $\frac{e}{k}$.

Pour ces raisons, la formule (2) me semble devoir être préférée, bien qu'on ne puisse pas l'affirmer avec certitude.

La quatrième formule ne présente pas d'intérêt spécial. Quant à la troisième, elle offre celui de renfermer l'expression $\frac{k-1}{k+1}$, dont les puissances successives figurent dans les valeurs du champ et du potentiel fournies par la théorie de Thomson. Mais il y a précisément cette différence que, d'après la théorie, le terme en $\frac{k-1}{k+1}$ serait nul et le développement ne renfermerait que les puissances supérieures de cette quantité. Remarquons d'ailleurs que, si la théorie donnait pour ce terme une valeur différente de zéro, cette valeur devrait être négative, et comme les termes des séries V et F vont en décroissant, l'effet du diélectrique serait de diminuer le champ en P, ce qui serait encore plus contraire à l'expérience.

CONCLUSIONS.

Les résultats contenus dans ce mémoire peuvent se résumer ainsi :

I. J'ai appliqué la théorie de Thomson au cas où l'on place, dans un champ produit par un seul point électrisé A, un diélectrique à faces planes, parallèles et infinies; j'ai calculé des expressions approchées : 1° des densités de polarisation sur les deux faces du diélectrique; 2° de l'intensité du champ et du potentiel en un point P situé sur la perpendiculaire abaissée de A sur la lame isolante et de l'autre côté de celle-ci.

II. J'ai étudié expérimentalement le même cas au moyen d'une balance de Coulomb légèrement modifiée, en faisant varier la distance des deux boules dans des limites aussi larges que possible, c'est-à-dire depuis la plus petite distance qui permette d'interposer le diélectrique, sans que ses faces se trouvent en contact avec les boules, jusqu'à la distance pour laquelle l'action électrique devient trop faible pour qu'on puisse la mesurer avec précision, soit environ 30 centimètres.

III. Dans ces conditions, l'effet du diélectrique équivaut à un rapprochement des deux boules; tout se passe comme si la plaque isolante, d'épaisseur e, était remplacée par une épaisseur d'air $e - \delta$.

IV. La distance δ peut être mesurée sur les courbes qui représentent les expériences : constante pour une même lame, elle paraît proportionnelle à l'épaisseur et dépend de la nature de la substance; elle peut donc être représentée par

$$\delta = e f(k).$$

V. J'ai essayé différentes formes empiriques de $f(k)$: mais, les valeurs de k étant peu différentes de 2 pour les substances employées, il me paraît impossible de déterminer avec certitude la forme qui doit être préférée. Pour diverses raisons, énoncées plus haut, j'inclinerais à adopter la valeur

$$f(k) = \frac{k-1}{k}$$

qui donne

$$\delta = e\left(1 - \frac{1}{k}\right).$$

Si l'on adopte cette formule, tout se passe comme si le diélectrique était remplacé par une épaisseur d'air $\frac{e}{k}$; l'effet serait donc analogue à celui qui se produit dans les condensateurs.

VI. Les lames employées étaient à base carrée et avaient 15 centimètres de côté; je n'avais pas cru devoir les faire plus grandes, pour éviter qu'elles fussent trop voisines des parois de la cage. Pour étudier l'influence des dimensions des plaques, j'ai coulé aussi quelques lames de paraffine ronde, de 19 centimètres de diamètre, qui ont donné les mêmes résultats que les plaques carrées; je crois donc que, à partir de 15 centimètres, les résultats sont indépendants des dimensions et les plaques peuvent être considérées comme infinies.

VII. Les résultats expérimentaux sont-ils contraires à la théorie de Thomson. Il me paraît difficile de l'affirmer avec certitude : 1° à cause de l'incertitude sur la forme de $f(k)$; 2° à cause de la forme sous laquelle se présentent les résultats du calcul. Comme on ne peut calculer

pratiquement qu'un petit nombre de termes de chaque série et qu'on est exposé à négliger des termes aussi importants que ceux qu'on a calculés, il est difficile de faire avec quelque précision la somme de ces séries. Je crois cependant, à cause de l'absence des termes en $\frac{k-1}{k+1}$, que les résultats du calcul ne doivent pas concorder avec l'expérience.

Je poursuis, en ce moment, une nouvelle série de recherches, dans laquelle j'ai l'intention de vérifier les premiers résultats par une autre méthode, de déterminer nettement la forme de $f(k)$ et, si c'est possible, d'obtenir des résultats plus généraux.

Julien LEFÈVRE,

Docteur ès sciences physiques,
Professeur au lycée et à l'école
des sciences de Nantes.

COMMUTATEUR MULTIPLE

DE TRÈS GRANDE CAPACITÉ

Il est incontestable que, de tous les systèmes de commutateurs employés dans les bureaux centraux téléphoniques, celui qui permet d'établir le plus rapidement les communications est le commutateur multiple, puisqu'il est disposé pour que chaque téléphoniste puisse trouver, à portée de sa main, un jack correspondant à celui des lignes du même bureau.

De cette disposition, il paraîtrait résulter que le nombre de lignes que peut desservir un multiple fût limité par le nombre de jacks que peut contenir l'espace dont tous les points sont accessibles à la main d'un seul opérateur. C'est pourquoi les inventeurs, après avoir donné aux jacks les dimensions les plus réduites, ont reporté les annonciateurs au sommet des tables pour laisser libre un nouvel espace susceptible de recevoir un nombre de jacks assez considérable. C'est ainsi que des tables de mêmes dimensions, et qui contenaient précédemment 6.000 jacks, ont acquis une capacité de de 9.000 jacks du système américain et 12.000 du système d'Adhémar. Mais ces perfectionnements, qui marquent déjà un progrès très appréciable, sont encore insuffisants pour réaliser un multiple satisfaisant aux conditions de l'exploitation d'un bureau téléphonique aussi important que celui de la rue Gutemberg, à Paris,

bureau qui, à une époque que l'on peut déjà prévoir, devra desservir plus de 20.000 lignes.

Déjà, en vue de satisfaire aux exigences d'un service aussi considérable, les services compétents ont eu à examiner divers projets ne différant les uns des autres que par certains détails d'exécution, mais qui consistent tous à installer plusieurs commutateurs multiples dans le même bureau. Les auteurs de ces projets semblent ne pas s'être préoccupés des inconvénients que présenterait l'exploitation d'un bureau installé dans ces conditions.

D'après ces projets, la plupart des communications devraient être établies par l'intermédiaire de deux commutateurs différents. Chaque téléphoniste, qui dessert facilement 80 annonciateurs d'un commutateur multiple, n'aurait plus seulement à répondre à 80 abonnés et à leur passer les communications qu'ils demandent ; elle devrait encore répondre à tous les appels des autres commutateurs et appeler à son tour les abonnés correspondant aux annonciateurs desservis par elle.

L'adoption de ces systèmes serait un retour au mode d'exploitation en usage dans les bureaux pourvus des commutateurs d'ancien modèle, et qui donne lieu à de nombreuses difficultés, avec cette aggravation que chaque téléphoniste devrait desservir 80 annonciateurs au lieu de 25.

Le système d'établissement d'un commutateur multiple de très grande capacité, qui fait l'objet du présent mémoire, est basé sur le principe suivant :

Quel que soit le nombre des lignes d'un commutateur multiple, et lors même que le plus grand nombre des jacks d'une même section seraient hors de portée

de sa main, un opérateur peut établir une communication aussi rapidement que dans les conditions ordinaires pourvu qu'il soit secondé par un ou plusieurs aides, selon la capacité du multiple. Un opérateur par poste suffit quand le commutateur ne dépasse pas 12.000 lignes. Un aide lui est nécessaire lorsque le commutateur comprend de 12 à 30.000 lignes. Enfin, si le commutateur devait comporter plus de 30.000 lignes, chaque opérateur aurait besoin d'un nouvel aide supplémentaire pour chaque excédent de 18.000 lignes.

Disons tout de suite que ce principe est la traduction, dans la pratique, d'une idée de M. Berthot, Directeur-ingénieur, qui consistait à donner à chaque téléphoniste le moyen d'introduire une de ses fiches dans un jack quelconque de sa section, quels que soient l'étendue de celle-ci et le nombre des jacks qu'elle contienne.

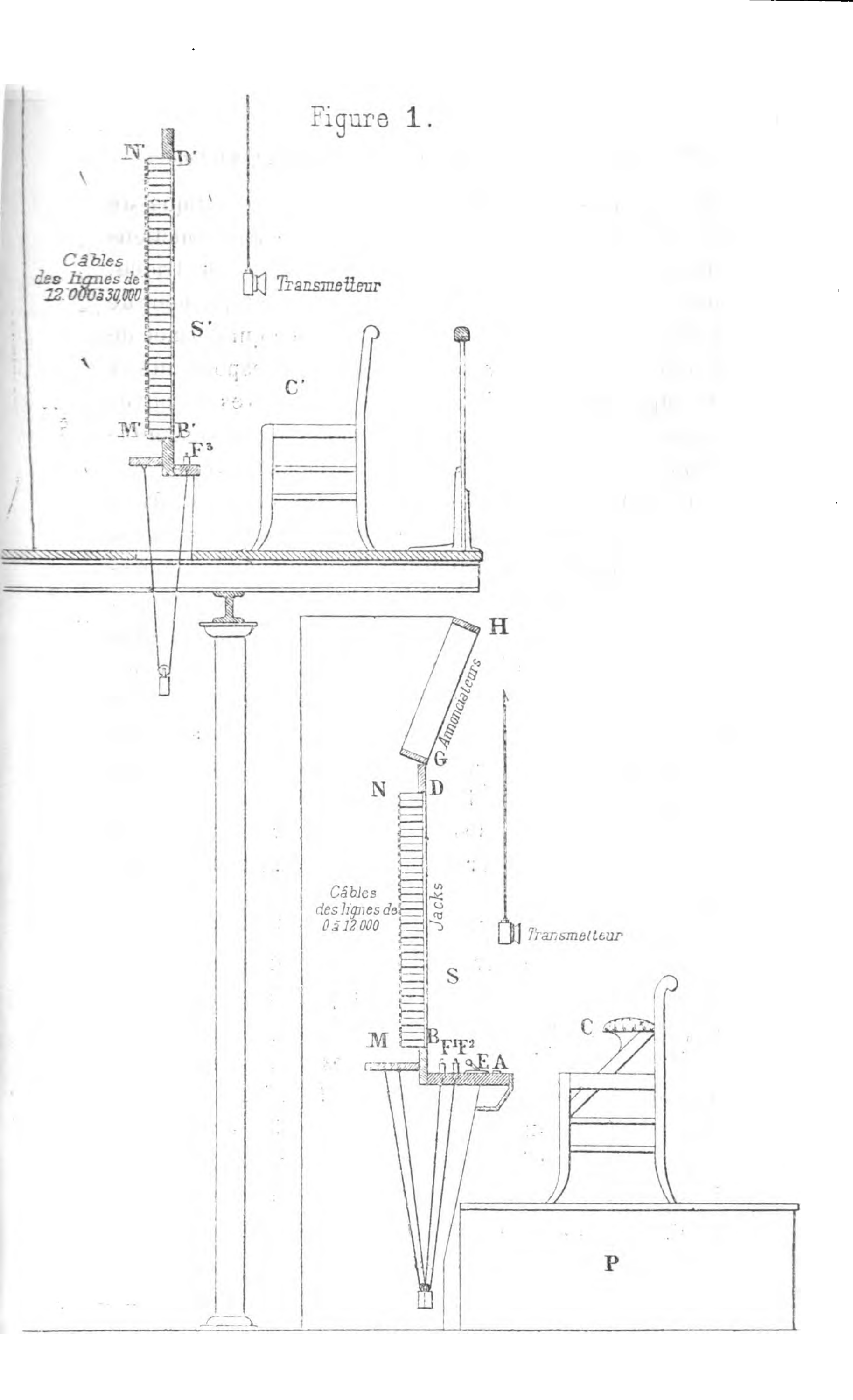
On va voir que cette idée est facilement réalisable.

La *fig.* 1 représente le profil d'une section d'un commutateur multiple ayant une capacité de 30.000 lignes.

Chaque section comprend deux meubles ou tables, S et S' qui, selon le local dont on dispose, peuvent se superposer dans la même pièce, ou être installés dans deux pièces différentes de ce local.

Le meuble S est analogue au meuble du commutateur actuellement en service au bureau de la rue Gutenberg, sous le rapport des dimensions ainsi que du nombre de postes, d'annonciateurs, de cordons, de fiches, de clefs d'écoute et d'appel qu'il comporte. Il en diffère par la disposition et l'exécution dans les détails des divers organes ainsi que par le nombre de jacks et de lignes qu'il peut contenir.

Les annonciateurs d'appel et de fin de conversation sont placés en GH, à la partie supérieure du meuble,


Figure 1.
N'
D'
Câbles des lignes de 12.000 à 30,000
Transmetteur
S'
C'
M'
B'
F³
H
Annonciateurs
G
N
D
Câbles des lignes de 0 à 12 000
Jacks
Transmetteur
S
C
M
B
F¹F²
E
A
P

ils sont supposés être à effacement automatique du système d'Adhémar, d'abord parce que leur fonctionnement n'absorbe qu'une très faible énergie électrique, mais surtout parce qu'ils s'isolent automatiquement de la ligne dès que celle-ci est occupée, ce qui permet de monter en dérivation tous les jacks correspondants et de supprimer radicalement ainsi les graves inconvénients résultant des contacts successifs que rencontre chaque ligne dans le montage des jacks en série.

En BD, sont les jacks généraux, les jacks locaux et les jacks de service. La place qui leur est réservée est calculée d'après les conditions de commodité que présente le multiple de la rue Gutenberg; c'est-à-dire que, les tables ayant la même largeur, les jacks les plus élevés sont à une hauteur de 1 mètre au-dessus des clefs d'appel d'écoute et d'appel. Dans l'espace ainsi limité, on peut loger 9.000 jacks généraux du système américain et 12.000 du système d'Adhémar; il y a donc tout intérêt à utiliser les jacks de ce dernier système, et d'autant plus qu'ils sont disposés pour être montés en dérivation et pour l'effacement automatique des annonciateurs.

L'espace MN est destiné à recevoir les câbles de montage reliant entre eux les jacks et les annonciateurs correspondant aux 12.000 premières lignes du multiple.

F^1 et F^2 sont les fiches d'une des paires de cordons accouplés; E est la clef d'écoute, et A, l'une des clefs d'appel correspondant aux fiches F^1 et F^2.

P est un faux plancher sur lequel on voit une chaise, à double siège, du modèle adopté pour le service du multiple de la rue Gutenberg, et destinée à l'une des trois téléphonistes qui desservent la table S.

Le meuble S′ est le complément de la table S pour former la section entière. Il ne comporte ni clef d'écoute ni clef d'appel. Il n'a qu'une fiche F^3 avec un simple cordon correspondant à chaque paire de fiches du meuble S. Puisqu'il n'y a ni clef d'écoute ni clef d'appel à manœuvrer, il n'y a aucun inconvénient à placer assez bas, par rapport à la chaise C′, la tablette de repos des fiches F^3 : on allonge dès lors par le bas l'espace B′D′ occupé par les jacks généraux de façon à y loger 18.000 jacks du système d'adhémar, les jacks placés au sommet restant toujours à portée de la main. Ces 18.000 jacks généraux correspondent aux annonciateurs et aux lignes portant les numéros du multiple compris entre 12.000 et 30.000. Les câbles de montage qui les relient entre eux sont logés en M′N′.

La chaise C′ est destinée à l'une des trois aides téléphonistes qui desservent le meuble S′.

Ainsi, chaque section comprend un meuble S que nous appellerons section principale et un meuble S′ que nous appellerons section complémentaire.

La section principale comporte 240 annonciateurs avec 240 jacks locaux, un certain nombre de jacks de service et 12.000 jacks généraux correspondant aux 12.000 premiers numéros des lignes et annonciateurs, 51 paires de cordons et fiches et 3 appareils téléphoniques. Elle est desservie par trois téléphonistes à raison d'une par tiers de section principale. Indépendamment des jacks généraux qu'elle peut prendre dans son tiers de section et dans les deux tiers de section voisins, il est affecté à chaque téléphoniste 80 annonciateurs d'appel avec leurs jacks locaux, 17 paires de cordons, fiches et clefs d'appel avec 17 annonciateurs

de fin de conversation et 17 clefs d'écoute, le tout numéroté de 1 à 17; enfin, un transmetteur téléphonique avec un récepteur.

La section complémentaire n'a ni annonciateurs ni jacks locaux, ni clefs; elle comporte seulement les jacks généraux du n° 12.000 au n° 30.000, 51 cordons et fiches, plus trois appareils téléphoniques. Elle est desservie par trois aides téléphonistes à raison d'une par tiers de section complémentaire. Chaque aide a, à sa disposition, un appareil téléphonique et 17 cordons et fiches numérotés de 1 à 17.

Chaque tiers de section complémentaire, desservi par une aide, correspond, dans l'ordre de son numéro, à un tiers de section principale desservi par une téléphoniste. La *fig.* 2 montre schématiquement, pour les appareils et une paire de fiches, comment l'appareil et les fiches de l'aide sont reliés à l'appareil et aux paires de fiches de la téléphoniste. On voit, d'une part, que les deux appareils téléphoniques sont dans le même circuit; d'autre part, que chaque fiche de l'aide est reliée à la fiche d'avant d'une paire de fiche correspondante de la téléphoniste.

Les fiches du système employé (d'Adhémar) sont formées de trois pièces métalliques isolées l'une de l'autre : la pointe et la partie médiane qui, selon la position de la clef d'écoute, sont reliées à l'annonciateur de fin de conversation ou aux appareils téléphoniques de la téléphoniste et de son aide, et le corps de la fiche qui est en relation constante avec l'un des pôles de la pile dite générale dont l'autre pôle est à la terre.

Les jacks du même système sont à trois contacts : deux ressorts intérieurs qui correspondent à la pointe et à la partie médiane des fiches et qui sont reliés aux

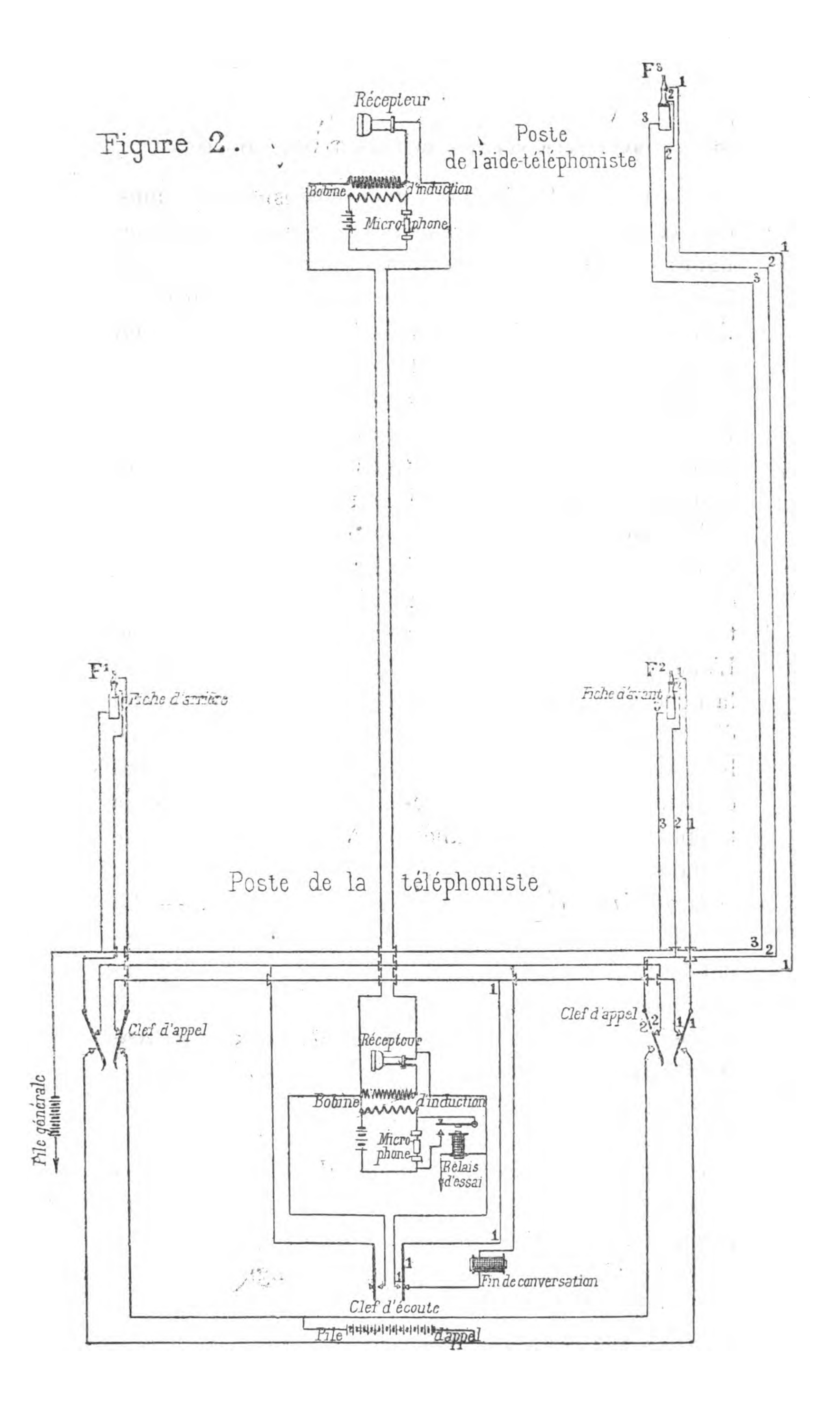


Figure 2.
Récepteur
Poste
de l'aide-téléphoniste
Bobine d'induction
Microphone
F3
Fiche d'arrière
Fiche d'avant
Poste de la téléphoniste
Clef d'appel
Clef d'appel
Pile générale
Récepteur
Bobine d'induction
Micro phone
Relais d'essai
Fin de conversation
Clef d'écoute
Pile d'appel

fils de ligne et à l'annonciateur correspondant, ainsi qu'aux ressorts intérieurs de tous les jacks de la même ligne; et une douille métallique antérieure reliée aux douilles de tous les jacks de la même ligne, ainsi qu'à l'électro-aimant qui a pour effet d'isoler l'annonciateur du circuit de la ligne et d'effacer son signal.

Cela exposé, il sera facile de comprendre le fonctionnement du système après les explications suivantes relatives aux diverses opérations que doivent faire les téléphonistes dans le service courant.

Un abonné appelle. — Dès que le signal de l'annonciateur apparaît, la téléphoniste saisit la fiche d'arrière d'une paire dont elle prononce le numéro devant son transmetteur en disant, par exemple, « *Fiche trois* ». L'aide téléphoniste, qui l'a entendue, saisit aussitôt la fiche n° 3 pendant que la téléphoniste met sa clet d'écoute sur appareil et enfonce sa fiche d'arrière dans le jack local correspondant, opération qui efface le signal de l'annonciateur et isole celui-ci de la ligne. Puis la téléphoniste répond à l'abonné en même temps qu'elle prend sa fiche d'avant, prête à s'en servir.

L'appelant demande l'abonné n° 15200. — La téléphoniste, qui n'a pas sous la main le jack correspondant, abandonne sa fiche d'avant et se tient prête à sonner par le bouton de la fiche d'avant. Pendant ce temps, l'aide, **qui a aussi entendu la demande de l'appelant,** essaie la ligne de l'abonné en touchant la douille du jack n° 15200 avec la pointe de sa fiche. Ici deux hypothèses se présentent :

1° *La ligne de l'abonné demandé est occupée.* — Dans ce cas, la douille du jack est en relation avec la pile générale par le corps de la fiche qui a été introduite dans l'un des jacks de la même ligne. Alors, à

chaque contact que l'aide fait avec la pointe de sa fiche, le courant de la pile générale passe par la fiche F^3 (*fig.* 2), le conducteur 1 du cordon, le ressort 1 et le contact 1 de la clef d'appel de droite; le conducteur 1, le ressort 1 et le contact 1 de la clef d'écoute, et va se perdre à la terre après avoir traversé le relais d'essai. L'armature de celui-ci est attirée et, par son contact sur son butoir inférieur, supprime la résistance du microphone dans le circuit primaire de la bobine d'induction de l'appareil de la téléphoniste. Il en résulte, dans le circuit secondaire de la même bobine, un courant induit qui produit un *clic* très accentué dans le récepteur de la téléphoniste comme dans celui de l'aide. Celle-ci abandonne sa fiche en prononçant devant son transmetteur «*n°* 15200 *en communication*». Aussitôt la téléphoniste retire du jack local sa fiche d'arrière et l'abandonne en même temps qu'elle remet la clef d'écoute sur fin de conversation.

2° *La ligne de l'abonné demandé est libre.* — Dans ce cas, la douille du jack n'étant pas en relation avec une pile, le relais d'essai ne fonctionne pas quand l'aide met la pointe de sa fiche en contact avec la douille; aucun bruit ne se manifeste dans les téléphones, et l'aide téléphoniste prononce devant son transmetteur le mot « *libre* ». Aussitôt, la téléphoniste sonne l'abonné demandé avec la clef d'appel de droite et, dès qu'il a répondu et qu'il est entré en conversation avec l'appelant, elle remet la clef d'écoute sur fin de conversation.

Lorsque le signal de fin de conversation apparaît, la téléphoniste prononce devant son transmetteur. « *Fiche n°* 3 ». L'aide porte la main près du jack 15200, prête à retirer la fiche; puis la téléphoniste appuie sur un

bouton spécial qui, dans le système d'Adhémar, sert de clef d'écoute tout en permettant d'effacer le signal de conversation, et, dans cette position, demande si la conversation est terminée; personne ne répondant à cette interpellation, l'aide retire sa fiche du jack général pendant que la téléphoniste retire la sienne du jack local.

L'abonné appelant demande l'abonné n° 5630. — Le jack général, ayant un numéro inférieur à 12000, se trouve dans la section principale; l'aide abandonne sa fiche qu'elle tenait prête, et c'est la téléphoniste qui établit la communication en procédant de la même façon que dans le service d'un commutateur multiple ordinaire. De même, lorsque la conversation est terminée, c'est la téléphoniste qui remet tout en ordre sans la secours de son aide.

Supposons (ce qui arrive quelquefois) que la téléphoniste ayant répondu à l'appel d'un abonné, les occupations de celui-ci l'ayant obligé de quitter son appareil, il tarde à répondre aux interpellations de la téléphoniste et que, pendant ce temps, un autre abonné appelle. Nous savons, par ce qui précède, que, à ce moment, l'aide téléphoniste tient en main la fiche dont la téléphoniste a annoncé le numéro. Celle-ci, sans rien dire à son aide, retire sa fiche d'arrière du jack local du premier abonné, l'enfonce dans le jack local du nouvel appelant, lui répond et établit la communication qu'il demande comme il a été dit précédemment avec ou sans le concours de son aide, selon que le numéro de l'abonné demandé est supérieur ou inférieur à 12000.

Il est certain que les opérations qui viennent d'être décrites pour le service d'un multiple de 30.000 lignes

peuvent, quoique exigeant le concours de deux personnes, s'effectuer aussi rapidement que celles qu'exécute une seule téléphoniste dans le service d'un multiple de moins de 12.000 lignes. Il en serait certainement de même pour le service d'un multiple de 48.000 lignes dont chaque section principale de 12.000 lignes desservie par une téléphoniste serait doublée de deux sections complémentaires de 18.000 lignes desservies par deux aides reliées à la téléphoniste, comme nous l'avons vu; car chaque aide opérerait dans sa section complémentaire sans que la téléphoniste ait à s'en occuper autrement qu'en nommant le numéro de la fiche qu'elle va prendre pour une opération quelconque.

L'adoption du principe de la division en sections principales et en sections complémentaires, desservies par des téléphonistes avec le concours d'une ou plusieurs aides, comme il est expliqué plus haut, nous semble devoir résoudre le problème de la réalisation pratique des commutateurs multiples de très grande capacité. Nous n'avons vu son application qu'au point de vue du nombre considérable des lignes que l'on pourrait desservir dans les conditions de commodité et de célérité que présentent les multiples actuellement en usage. C'est seulement par l'observation attentive et l'étude méthodique des besoins auxquels il faut répondre, qu'on déterminera l'application la plus judicieuse de ce principe.

Ainsi, par exemple, de l'avis même des ingénieurs compétents, on pourrait très avantageusement appliquer ce système pour établir un commutateur multiple de 20.000 lignes donnant aux téléphonistes, ainsi qu'aux aides de taille moyenne, la commodité de faire

le service tout en restant complètement assises. Il suffirait pour cela que les jacks les plus élevés ne fussent pas à une hauteur de plus de 80 centimètres au-dessus des clefs d'écoute pour les sections principales et à une hauteur analogue pour les sections complémentaires.

Or, dans cette limite, et en employant les jacks du système d'Adhémar, on peut, indépendamment des jacks locaux et de service, loger 9.000 jacks généraux dans chaque section principale et 12.000 dans chaque section complémentaire; c'est-à-dire réaliser un multiple complet d'une capacité de 21.000 lignes.

SIEUR.

STATIONS TÉLÉPHONIQUES AUTOMATIQUES

(Suite) (*).

X (suite).

Un dernier système, appliqué depuis six ans dans un certain nombre d'installations particulières, est dû à M. Bernheim.

Pour chaque mise en communication, il oblige l'abonné à manœuvrer une ou plusieurs manettes. On lui laisse donc une beaucoup plus grande part d'initiative que ne le permettrait une exploitation de grand réseau. *A priori*, c'est un inconvénient grave. Par ce fait, également, le problème s'est trouvé considérablement simplifié et ramené en somme à la recherche d'un procédé d'appel; c'est à ce point de vue surtout — nous l'avons montré — que s'étaient placés les Américains.

Dans l'appel Bernheim il est fait usage de relais sans armature de fer et à peu près semblables aux relais Ader.

La *fig.* 49 donne le dessin d'un d'entre eux, assez complètement pour qu'il soit inutile de s'arrêter à une description détaillée.

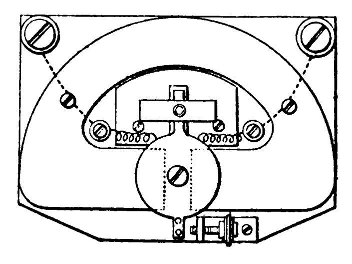


Fig. 49.

Chaque poste d'abonné est desservi par deux fils,

(*) Voir *Annales Télégraphiques*, 1893, p. 108.

et muni de deux de ces relais, un sur chaque conducteur. Une terre est à l'état normal établie aux extrémités de la boucle du circuit. Sur chacun des fils on peut, par suite, envoyer un courant spécial actionnant les relais qui y sont embrochés. Le jeu convenable des deux palettes provoque, dans chacun des postes, la fermeture de son circuit d'appel.

La *fig.* 50 représente le dispositif des butées proposé par M. Bernheim :

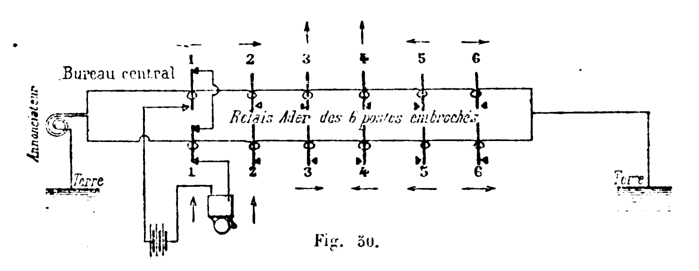


Fig. 50.

Au poste 6 par exemple, les deux relais doivent s'appliquer sur leurs butées de droite pour amener l'appel.

Au poste 5, le relais du fil 1 doit aller à gauche et le relais du fil 2 doit demeurer immobile, etc.

On a marqué, pour plus de commodité, à l'aide de flèches le mouvement que doivent prendre les armatures pour obtenir en chaque poste la formation du circuit local.

Dans ces conditions, M. Bernheim propose d'embrocher sept postes sur un même circuit, chacun d'eux pouvant répondre à un appel déterminé à l'exclusion de tous les autres.

En réalité on peut, comme l'a fait remarquer M. Serruau, augmenter ce nombre de deux. La *fig.* 51 donne, indiquée de la même façon que précédemment, la succession des combinaisons dans cette hypothèse.

Dans le premier dispositif proposé par M. Bernheim, on ne supposait nullement qu'un des postes jouât le rôle de station centrale par rapport aux autres.

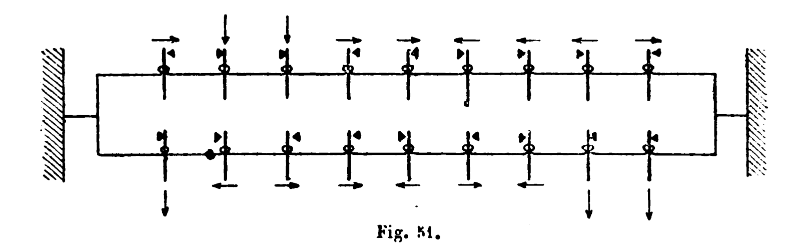


Fig. 51.

Chacun d'eux était donc muni :

1° D'une clé d'appel A et d'autant de touches *t* qu'il y avait d'autres postes embrochés. En abaissant une de ces touches déterminées, on amenait sous les butées de la clé A les pôles de pile nécessaires à l'appel du poste choisi.

2° De deux commutateurs à six lames B et B′, et de deux commutateurs à deux lames C et C′.

Aux deux postes extrêmes, ce dispositif était d'ailleurs simplifié et réduit à un commutateur à deux lames G.

Ces commutateurs permettent, comme on va le voir, de faire communiquer avec la terre les extrémités des deux fils de ligne dans chacune des sections qui se trouvent de part et d'autre d'une portion occupée. Un poste quelconque d'une section inoccupée peut donc encore communiquer avec un poste de la même section que lui.

Remarquons d'abord qu'à l'état normal les commutateurs sont orientés comme l'indique la *fig.* 52. Les postes téléphoniques et les claviers sont en dehors du circuit ; en outre, les relais *r*, *r*, sont tous embrochés sur les fils et sont par suite susceptibles de recevoir l'appel.

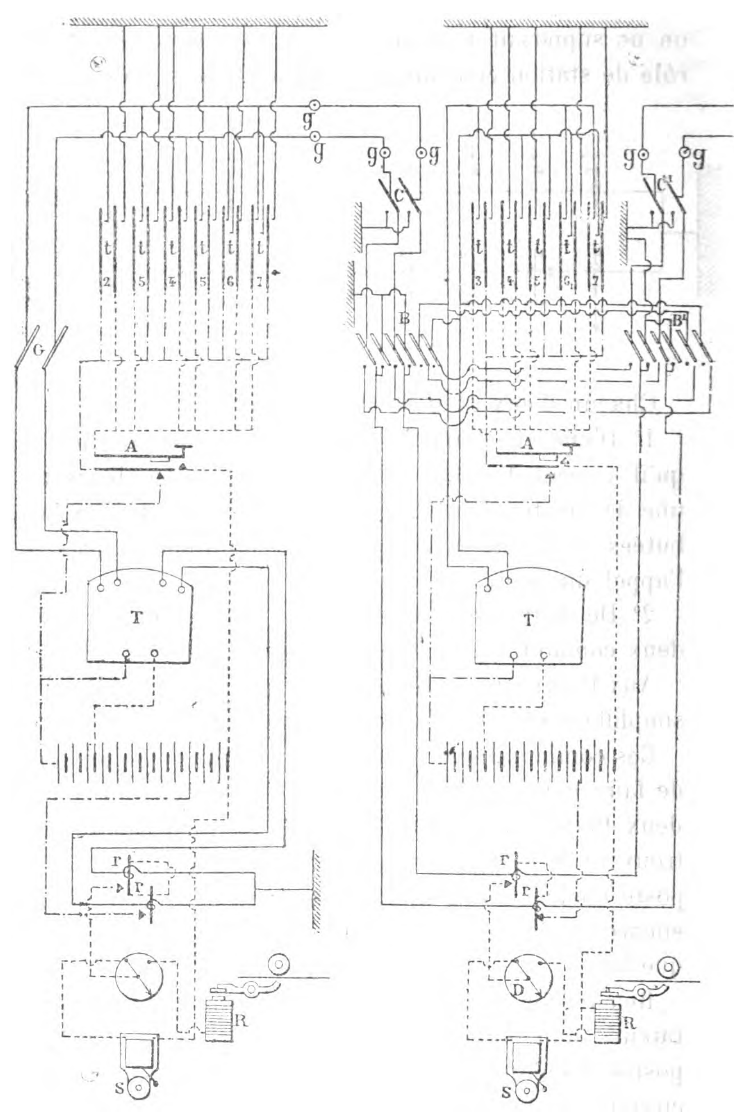


Fig. 52.

Supposons maintenant que le poste 2 désire appeler le poste 4.

Il déplace d'abord vers la gauche les commutateurs C et B'.

Le déplacement de C a pour résultat de mettre à la terre les extrémités des deux fils du circuit venant du côté gauche du poste. Le poste 1, par suite, est bloqué et ne peut plus surprendre la conversation.

La manœuvre de B' a pour effet d'introduire à l'extrémité des deux fils du circuit de droite, le clavier d'appel et le poste téléphonique n° 2.

Si l'abonné abaisse ensuite la touche 4, il appellera le poste 4 en appuyant sur la clé d'appel double A.

On a vu, d'après le schéma des appels (*fig.* 50), que pour appeler le poste 4 il fallait envoyer sur le fil 2 un courant faisant osciller la palette de relais vers la gauche. Aucun courant ne doit au contraire passer sur le fil 1. Il est facile, en suivant les communications du croquis, de vérifier que les choses se passent bien ainsi.

Chaque poste doit, en outre, sonner autant de coups qu'il y a d'unités dans son numéro d'ordre. Le poste 4 sait donc immédiatement qu'il est appelé par le poste n° 2 situé à sa gauche.

Pour que la conversation s'établisse, il suffira que chacun des postes 4 et 2 orientent leurs commutateurs.

Au poste 4 on dévie B et C' vers la gauche, C et B' restant à la position de repos.

Au poste 2, on relève la touche t_4 et on laisse B' et C vers la gauche.

On a indiqué plus haut pour ce poste 2 l'effet de cette position de B' et C.

Au poste 4, en déplaçant B et C' vers la gauche, B' et C

restant fixes, on a fait communiquer avec le téléphone du poste la portion de la ligne située à gauche du poste 4. Le déplacement de C′ à gauche a eu en même temps pour résultat de mettre à la terre la section de ligne du côté droit. Cette dernière peut donc être encore utilisée par les postes 5 et 6.

La *fig.* 52 donne un ensemble de communications permettant, en outre, aux divers postes de substituer à leurs postes téléphoniques des appareils télégraphiques. Il est inutile de s'arrêter sur ce point.

Il est facile, d'après ce qui précède, de voir que si le système dû à M. Bernheim est praticable dans le cas d'installations privées, il devient d'une application malaisée dans une exploitation de réseau. Il est toujours délicat de confier à un public absolument inexpérimenté des manœuvres de commutateurs. *A fortiori*, semblera-t-il plus dangereux de lui laisser un choix entre ces manœuvres. Les seules opérations qui peuvent être faites par l'abonné doivent être d'une nature tellement simple qu'une erreur de sa part soit impossible ; de plus elles ne doivent jamais être de nature à entraver le service dans le cas d'oubli ou de fausse manœuvre.

Le système Bernheim, en dépit de son ingéniosité, ne répond pas à cette condition. Les modifications que lui a fait récemment subir son inventeur n'ont pas supprimé ce défaut et c'est la raison pour laquelle nous n'y insisterons pas ici.

XI.

Quelle conclusion pratique convient-il de tirer de cette longue revue des systèmes téléphoniques automatiques ?

Les appareils proposés peuvent être divisés en deux groupes.

Les premiers, d'un fonctionnement peu sûr ou ne sauvegardant pas l'indépendance entière des communications ne pourraient être acceptés dans des réseaux tels que les réseaux français où le public est accoutumé à une grande régularité dans le service.

Les seconds, solutions ingénieuses et complètes de la question, n'arrivent à ce résultat qu'en utilisant des organes délicats et coûteux. Leur prix de revient dépasserait dans la plupart des cas l'économie de fil correspondante.

Beaucoup d'appareils indiqués par leurs auteurs plutôt que réalisés, ont été soumis à l'appréciation du public depuis l'origine de cette étude. Sans avoir la prétention d'avoir passé en revue la totalité des systèmes possibles, on peut dire que la plupart rentrent pourtant dans les catégories diverses dont le principe a été exposé ici.

Dans aucun cas, ce n'est l'ingéniosité qui a manqué; s'il est un reproche à faire, c'est au contraire une trop grande complexité de moyens, complexité entraînant du même coup une élévation de prix considérable et un entretien difficile.

Enfin, un fait nouveau est survenu qui a modifié complètement la nature du problème : l'exploitation des grands réseaux tend à se faire désormais à peu près exclusivement à l'aide d'appareils multiples. Comme la complication de ces multiples se prêterait mal à des règles particulières d'appel concernant des groupes d'abonnés spéciaux, la recherche des petites stations automatiques s'est trouvée, par ce fait même, reléguée au second plan. Quelque simples qu'elles soient, elles

ne paraissent plus pouvoir trouver place dans le nouvel outillage mis en œuvre.

Les conclusions auraient donc été, à première vue, assez décourageantes si, des conditions nouvelles de l'exploitation téléphonique, n'avait surgi l'idée audacieuse — et, il faut l'espérer, féconde — d'étendre le champ de la station automatique, en l'obligeant à mettre en communication non plus deux, six ou même dix abonnés, mais la totalité des abonnés d'un réseau.

On voit à ce desideratum divers avantages.

Les multiples téléphoniques, actuellement en service, ont réussi à supprimer l'intermédiaire des lignes de renvoi, et les téléphonistes desservant ces dernières. Un seul employé suffit pour établir une communication entre deux abonnés quelconques.

Le multiple automatique supprimerait ce dernier intermédiaire et laisserait au public le soin de se mettre lui-même directement en relation avec les abonnés qu'il désire.

Le bureau central n'existerait plus qu'au point de vue *machines* : le personnel actuel deviendrait inutile, et l'unique intervention d'un mécanicien surveillant le fonctionnement de l'appareil resterait nécessaire.

La voie nouvelle est encore trop récente pour qu'il soit possible de donner ici des appareils réalisés. Toutefois, ne fut-ce que pour indiquer la possibilité de résoudre ce problème, il est nécessaire de terminer cette étude par une description sommaire du principe de l'autocommutateur téléphonique de MM. Verner et Tedesco.

Dans ce système, chaque abonné est relié au bureau central à l'aide de 2 fils — l'un dit *fil d'appel* sert uniquement à la mise en contact avec la ligne désirée —

l'autre sert à la conversation et est appelé par l'inventeur *fil de son.*

Au bureau central, tous les fils de son sont reliés à des barres verticales $i_1 i_2$, pouvant au besoin pivoter légèrement sur elles-mêmes. Chacune de ces barres est ensuite reliée électriquement à une courroie horizontale recouverte de matière conductrice $C_1 C_2$, etc. Il y a donc autant de courroies que de fils et de barres.

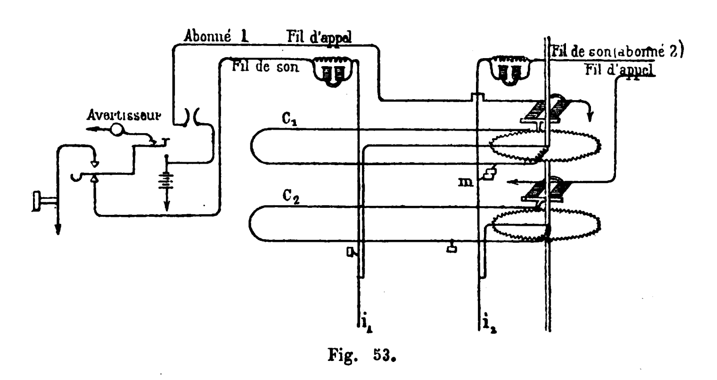


Fig. 53.

Ces courroies peuvent décrire, dans leur déplacement, une sorte de spirale carrée entre les parties de laquelle passent les barres $i_1 i_2$, etc. Elles sont disposées les unes au-dessus des autres de manière à former des colonnes verticales.

La projection horizontale d'une de ces courroies est représentée *fig.* 54.

aaa sont des tiges polies servant de support et dirigeant la course : $i_1 i_2 i_3$ sont les barres verticales dont on a parlé plus haut.

En regard de chaque courroie, ces dernières sont armées, en outre, de contacts portés par des ressorts. La courroie est munie d'un contact analogue. Grâce à ce dispositif quand cette dernière se déplace, on conçoit

qu'elle se mette successivement en rapport avec chacune des barres $i_1 i_2$ et par conséquent avec chacun des fils de son des abonnés.

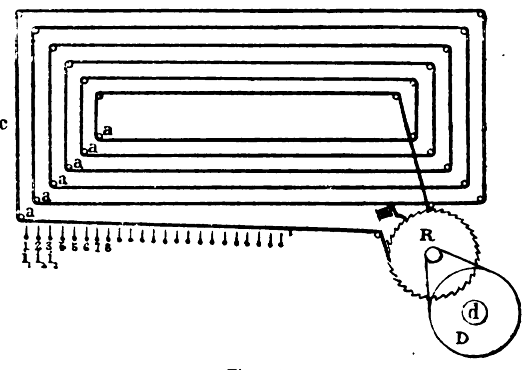


Fig. 54.

La courroie est mise en marche par une transmission D qu'actionne une machine ; l'arbre *d* est toujours en mouvement et tend à entraîner la roue R. Un cliquet commandé par un électro-aimant arrête le mouvement et, par suite, empêche le déplacement de la courroie. Le fil d'appel se rend à cet électro-aimant, puis à la terre. A chaque manœuvre de l'armature, le cliquet est soulevé, une dent de la roue R peut passer et la courroie avance d'un contact.

Si les barres verticales ont été disposées dans l'ordre de numéro des abonnés, pour que l'un d'eux se mette en relation avec l'abonné n° 365, il lui suffira d'envoyer 365 émissions sur son fil d'appel.

Outre les circuits ordinaires, le poste d'un abonné comprend, à cette intention, un appareil d'appel et un avertisseur.

L'appareil d'appel comporte extérieurement des

cadrans pareils à ceux d'un compteur, et servant à compter les mille, centaines, dizaines et unités.

Chacun de ces cadrans porte 10 numéros (0 à 9).

Pour appeler l'abonné 365, il suffira de mettre l'aiguille des centaines sur 3, celle des dizaines sur 6, celle des unités sur 5.

La manœuvre de ces aiguilles provoque, à l'aide de trains d'horlogerie sur laquelle il est inutile d'insister, le nombre de fermetures correspondantes du circuit d'envoi.

Il convient de remarquer qu'au central, les barres verticales sont groupées par dix et qu'entre chaque dizaine est laissée une place libre. C'est devant cette place libre que s'arrête le contact de la courroie lorsqu'on met l'aiguille sur 0.

Au repos, le fil de son aboutit à l'avertisseur qui est une sonnerie combinée avec un voyant.

Le fonctionnement s'explique de lui-même; il suffit d'appuyer sur le bouton d'appel lorsqu'on a amené la courroie du central à sa position convenable pour envoyer l'appel dans l'indicateur de l'abonné choisi.

Cet appel provoque, en outre, un autre résultat. La *fig.* 53 montre, en effet, que des électro-aimants sont placés en dérivation sur le fil de son de chacun des abonnés. Le passage du courant d'appel dans les électros provoque une faible rotation des tiges i_1 i_2 autour de leurs axes. Grâce à leurs ressorts, les plaques de contact réunies en m ne se séparent pas mais aucune courroie nouvelle ne peut plus entrer en contact avec les barres qui ont tourné. Les deux abonnés qui causent ne risquent point d'être dérangés.

Il serait de peu d'intérêt d'entrer dans plus de détails, ou même d'indiquer les simplifications considé-

rables dont le projet de ces inventeurs est susceptible.

Ce qu'il était bon de montrer, c'est que l'idée du multiple automatique est posée. Elle paraîtra sans doute hardie et d'une réalisation encore impossible à beaucoup de praticiens. La même incrédulité a accueilli, il y a dix ans, la première idée des multiples dont l'usage aujourd'hui se répand universellement. Il n'y a pas de problème nouveau qui, de prime-abord, n'excite l'étonnement. Celui-ci ne se heurte à aucune impossibilité. Il est de plus particulièrement intéressant, puisque sa solution serait de nature à amener une transformation totale dans l'exploitation téléphonique courante.

E. Estaunié.

SUR LA

NATURE DE LA RÉFLEXION DES ONDES ÉLECTRIQUES

AU BOUT D'UN FIL CONDUCTEUR

Note de MM. Kr. BIRKELAND et Ed. SARASIN (*).

Dans une communication du 17 avril 1893, un de nous a cherché, en partant de la théorie du mouvement de l'énergie électro-magnétique dans l'espace, à faire une hypothèse sur ce qui se passe au voisinage du bout d'un fil métallique le long duquel se propagent des ondes électriques.

Nous avons étudié la question expérimentalement ensemble, en explorant le champ électrique autour de l'extrémité du fil, avec de petits résonateurs de $0^m,10$ et $0^m,25$ de diamètre, et, bien que la manière de voir exposée dans la note précitée n'ait pas été confirmée de tous points par nos résultats, ceux-ci n'en apportent pas moins une contribution expérimentale intéressante aux théories remarquables de M. Poynting.

Voici d'abord quelques brèves indications sur les arrangements des expériences. Les ondes électriques étaient fournies par un petit excitateur à plaques, dont l'étincelle, de 3 millimètres environ, éclatait dans l'huile.

En face d'un des disques primaires se trouvait un disque semblable duquel partait un tube de cuivre de $0^m,01$ de diamètre et de 9 mètres de longueur.

Le tube, qui se terminait librement dans l'air,

(*) *Comptes rendus*, t. CXVII, n° 19.

était supporté par de minces tiges de bois de $1^m,5$ de hauteur.

Les résonateurs employés étaient toujours circulaires et fixés verticalement, avec l'étincelle en haut; ils étaient capables de deux sortes de mouvements: l'un rotatoire autour d'un axe vertical passant par l'étincelle, l'autre translatoire parallèle au tube conducteur.

Nous nous sommes arrangé de manière à pouvoir marquer, même dans l'obscurité : 1° la distance du centre de notre résonateur au bout du fil conducteur (comptée parallèlement à ce fil); 2° l'angle que formait le plan de celui-ci avec ce fil.

Nos recherches ont porté sur deux points principaux; nous avons d'abord déterminé les quatre premiers nœuds dans sept distances différentes du fil, le plan du cercle restant toujours normal à celui-ci. Les nœuds sont déterminés au moins par dix mesures chacun; les résultats numériques ainsi obtenus pour le cercle de 10 centimètres sont consignés dans le tableau ci-joint. Les différentes distances du résonateur au fil conducteur sont comptées entre l'axe de celui-ci et le point le plus rapproché du cercle. Les nombres dans chaque rubrique donnent la distance de chaque nœud à la normale élevée au bout du fil.

	DISTANCE DU RÉSONATEUR AU FIL CONDUCTEUR						
	2^{cm}	10^{cm}	20^{cm}	30^{cm}	40^{cm}	50^{cm}	60^{cm}
1er nœud	16	15,4	9,5	7,7	1,8	—9,8	»
2e —	56,4	56,3	54,2	51,5	47,3	44,8	37,7
3e —	96,5	95,7	95,2	93,5	90,5	88,9	87,5
4e —	135	135,8	135,1	134,6	130,8	129,7	130,5
1er internœud	40,4	40,9	44,7	43,8	45,5	54,6	»
2e —	40,1	39,4	41	42	43,2	44,1	49,8
3e —	38,5	40,1	39,9	41,1	40,3	40,8	43

Dans la *fig.* 1, nous avons représenté par des croix la position du centre du résonateur de 10 centimètres dans les vingt-sept nœuds numériquement donnés plus haut. Les ronds portés sur la même figure marquent les positions des nœuds donnés par un cercle de 25 centimètres de diamètre dans quatre distances différentes du tube conducteur.

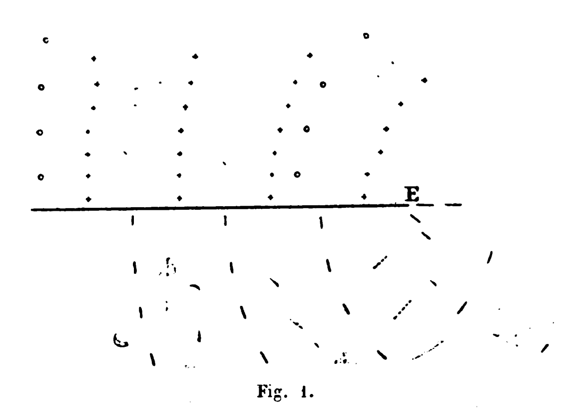


Fig. 1.

L'impression qui résulte immédiatement de la répartition de tous ces nœuds est que, si le premier *choc* arrive au résonateur à peu près parallèlement au fil conducteur, le second doit y arriver par un rayonnement direct partant du voisinage de l'extrémité du fil. En effet, tous les nœuds sont situés sensiblement comme si l'énergie, provoquant le second *choc* dans le résonateur, marchait *tout près* du fil jusqu'au moment où il est arrivé au bout, puis se dirigeait, à partir de là, directement sur le cercle. Il faut remarquer pourtant que cette manière d'envisager la réflexion ne justifie pas le retrait considérable du premier nœud quand le résonateur se trouve tout près du fil conducteur, un retrait qui, selon les expériences de MM. Sarasin et de

la Rive, est d'autant plus grand que le cercle est plus grand lui-même. Nous croyons cependant avoir bien constaté maintenant que ce retrait et dû à la forme géométrique du résonateur; les chocs électriques arrivant le long de deux conducteurs rectilignes tendent à charger chacun la portion la plus rapprochée du résonateur, de sorte que la première oscillation se produit entre deux parties diamétralement opposées du cercle. L'électricité ne tardant pas cependant à osciller dans toute l'amplitude du cercle, celui-ci prend alors sa période normale et les nœuds se disposent en conséquence le long du fil.

En second lieu, nous avons cherché comment il faut trouver le plan du résonateur autour de son axe vertical pour que l'effet total des deux « chocs » qui en excitent les oscillations soit aussi grand que possible.

On trouvera ces directions indiquées dans la *fig.* 1 ; elles ont été déterminées pour la plupart là où doivent se trouver les « maxima », d'après les mesures des nœuds. Parmi les autres orientations figurées, il s'en trouve deux qui ont été prises dans des nœuds (traits pointillés). Ces directions d'effets maximum donnent, nous semble-t-il, forcément l'impression d'un rayonnement direct du bout du fil.

Des trois séries d'observations faites dans le milieu des internœuds, il ressort, en effet, que la normale au cercle est dirigée à peu près suivant la bissectrice de l'angle que forme avec la parallèle au fil conducteur la ligne allant directement à l'extrémité du fil. Les deux observations faites dans les nœuds mêmes montrent que, pour y avoir l'*effet maximum*, il faut orienter le cercle de telle sorte que les ondulations électriques

venant au bout du fil arrivent normalement sur son plan et que l'action du second choc soit par ce fait annulée.

Les résultats que nous venons d'énoncer permettent de donner un certain développement à la conception « du tube électrique en marche », imaginé par quelques savants anglais. Admettons que le tube électrique de l'*onde directe*, qui se meut en chaque point normalement à sa direction instantanée, est à peu près rectiligne et normale au fil conducteur; il n'en sera plus de même dans l'onde réfléchie.

Or les mesures faites par l'un de nous, des interférences sur la surface même du fil conducteur montrent qu'il n'existe dans ce cas aucun retrait sensible du premier nœud, et que, par conséquent, la partie du

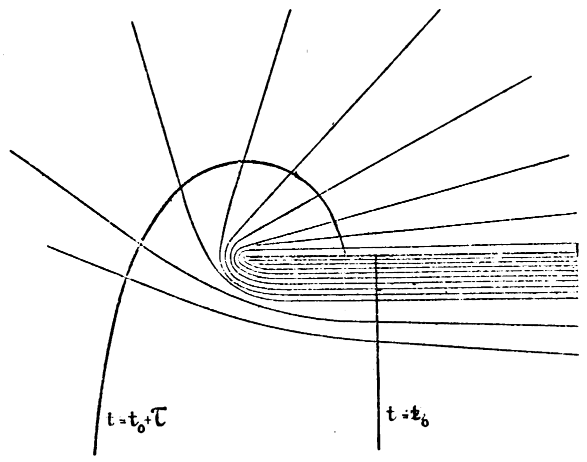


Fig. 2.

tube électrique immédiatement voisine du conducteur fait le tour autour de l'extrémité de celui-ci presque sans retard. Mais les parties éloignées du tube ne

peuvent pas parcourir simultanément la même distance angulaire ; elles restent en arrière et le tube électrique se courbe alors à peu près comme une queue de comète autour de l'extrémité du fil (*fig.* 2).

Telle serait donc l'origine de ce rayonnement caractéristique partant du bout du conducteur, dont nous croyons pouvoir admettre l'existence. Il résulterait de ce que, les éléments du tube électrique continuant à se mouvoir normalement à leur direction instantanée, l'énergie s'éloigne du bout du fil pour se répandre dans tout l'espace ambiant (*).

(*) Il doit donc se produire une perte sensible d'énergie à la réflexion. Nous avions espéré compléter notre travail sur ce point par des mesures sur le fil même (Cf Birkeland, Wied. *Ann.*, t. XLVII, p. 583). Pour trois longueurs d'onde $\lambda_1 = 6^m$, $\lambda_2 = 2^m,7$ et $\lambda_3 = 1^m,2$, nous avons trouvé que l'onde réfléchie est respectivement 0,6, 0,45 et 0,35 de l'onde directe. Or, nous avons imaginé une autre méthode pour mesurer directement la perte, et nous n'avons pas retrouvé ces valeurs, de telle sorte que nous ne pouvons les donner que sous toutes réserves, n'ayant pas réussi encore à expliquer ces résultats contradictoires.

SUR LES MOYENS D'AUGMENTER LA SÉCURITÉ DES DISTRIBUTIONS A COURANTS ALTERNATIFS DE HAUTE TENSION

Note de M. G. CLAUDE (*).

On a déjà signalé, à diverses reprises, l'influence de la capacité des canalisations à courants alternatifs pour abaisser l'isolement apparent de ces canalisations. Je me propose, dans cette note, d'insister plus particulièrement sur les conséquences qui résultent de ce fait, au point de vue du danger pour la vie humaine, et sur les moyens que l'on peut employer pour diminuer ce danger dans une notable proportion.

D'une manière générale, la capacité des câbles, répartie uniformément sur toute leur longueur, peut, quant à son ensemble, être divisée en deux parties :

1° La capacité directe C_1, entre les deux câbles, qui se traduit, en marche, par une résistance d'isolement apparente $\frac{1}{\omega C_1}$ entre ces deux câbles;

2° La capacité C, C' de chacun des câbles par rapport à la terre, qui se traduit par une résistance apparente par rapport à la terre $\frac{1}{\omega C}$ pour l'un, $\frac{1}{\omega C'}$ pour l'autre.

Les valeurs de ω, C_1, C et C' sont d'ailleurs telles en pratique que les résistances apparentes correspondantes sont, tout au plus, de quelques milliers d'ohms,

(*) *Comptes rendus*, t. CXVII, n° 21.



et que l'on peut, par conséquent, faire abstraction devant elles des résistances d'isolement ohmique ρ_1, ρ et ρ', trouvées pendant l'arrêt, qui sont toujours au moins de l'ordre de grandeur des dizaines de mégohms.

Or, si la résistance apparente $\frac{1}{\omega C_1}$ entre les deux câbles n'intervient pas au point de vue spécial auquel nous nous nous plaçons, quelque faible d'ailleurs qu'en soit la valeur, il n'en est pas de même des résistances apparentes $\frac{1}{\omega C}$ et $\frac{1}{\omega C'}$ par rapport à la terre, et la faible valeur qu'elles présentent toujours peut conduire à des conséquences très graves pour la vie humaine : si l'on vient à toucher, étant à la terre, un seul point d'un réseau de haute tension, le circuit se ferme sur l'autre pôle à la faveur du faible isolement apparent, et la secousse qui en résulte peut compromettre la vie. Si, au contraire, nous concevons que, par un artifice quelconque, on parvienne à rendre beaucoup plus grand cet isolement apparent, le danger, dans ces conditions, sera supprimé puisque le circuit ne pourra plus se fermer par la terre. Pour qu'il y ait danger, il faudra alors toucher simultanément les deux pôles de la canalisation, ce qui ne se produira que dans des circonstances évidemment beaucoup plus rares que le fait de toucher un seul pôle; la cause la plus fréquente d'accidents sera donc éliminée.

Ce résultat, d'après ce qui précède, est facile à atteindre : il suffit d'annuler la capacité des câbles par rapport à la terre ou d'en combattre les effets.

Pour arriver à ce but, trois moyens sont à notre disposition :

1° L'expression de la résistance apparente étant de

la forme $\frac{1}{\omega C}$, une canalisation donnée, quant à la capacité, sera d'autant mieux isolée que la fréquence employée sera plus basse ;

2° Pour une canalisation en projet, il conviendra, par des dispositions appropriées, de rendre minima la capacité par rapport à la terre. On arrivera, à cet égard, à des résultats très appréciables, en plaçant les câbles au centre de tuyaux de grand diamètre, et surtout en employant de préférence des câbles aériens ;

3° Enfin, et ce procédé a, sur les précédents, l'avantage de pouvoir s'appliquer à une distribution existante, on pourra combattre la capacité par les effets bien connus de self-induction L, L', placées en dérivation sur C et C'. En supposant négligeables la résistance de la terre et celle de l'âme des câbles, ce qui revient à considérer, comme un condensateur unique C ou C', la capacité répartie en réalité tout le long des câbles, on voit facilement que, par l'adjonction d'une self-induction convenable, on peut remplacer l'intensité de perte à la terre primitive

$$I_1 = -E\omega C \cos \omega t,$$

dans laquelle E est la différence de potentiel aux bornes C_1 par une nouvelle perte à la terre

$$I_2 = E\omega C \cos\varphi \sin(\omega t + \varphi_1)$$

dont l'amplitude $E\omega C \cos\varphi$ est toujours plus petite que l'amplitude primitive $E\omega C$. Pour rendre l'isolement apparent infini, il faudrait $\cos\varphi = 0$ d'où $\varphi = 90°$, c'est-à-dire une self-induction parfaite que l'on ne peut pratiquement réaliser. En pratique, au moyen de bobines de réaction convenables, on peut arriver à $\cos\varphi = 0{,}04$,

de sorte qu'il est possible de rendre vingt-cinq fois plus grand l'isolement apparent.

D'ailleurs, la résistance de la terre et celle des câbles n'étant pas nulles, comme nous l'avons admis, il serait préférable, surtout dans le cas de câbles non armés, d'effectuer la neutralisation de la capacité par des self-inductions partielles, réparties comme elle tout le long de chaque câble.

Pour une canalisation en projet, rien n'empêcherait de combiner deux des moyens précédents, c'est-à-dire de combattre par de la self-induction une capacité déjà rendue aussi faible que possible par des précautions spéciales, et d'arriver ainsi à des conditions de sécurité tout à fait bonnes.

Il convient d'ajouter enfin que, jusqu'ici, nous n'avons tenu aucun compte de la période variable qui précède l'établissement du régime permanent chaque fois que les conditions du système sont changées, en particulier, chaque fois qu'on touche l'un des câbles étant à la terre.

Les conséquences de ce régime variable se réduisent au maximum à l'effet de la secousse de très faible durée correspondant à la décharge de la capacité de la ligne, chargée à la moitié du potentiel de la distribution, cette décharge étant d'ailleurs atténuée à chaque instant, dans une certaine mesure, par l'action en sens inverse provenant de la self-induction.

On peut se demander si cette secousse est encore suffisante pour être dangereuse. Les expériences effectuées couramment en électrostatique, avec des capacités plus faibles, il est vrai, mais avec des différences de potentiel infiniment plus grandes, permettent de répondre par la négative.

EMPLOI DU FIL DE RETOUR

DANS LA TRACTION ÉLECTRIQUE (*)

La question du fil de retour dans la *Traction électrique*, à l'ordre du jour dans tous les pays, a été examinée, en Angleterre, par une commission spéciale.

Voici les principaux avis émis par cette commission.

Le fil de retour doit être ou bien isolé ou bien nu, mais alors présenter une résistance électrique faible, et toutes les précautions raisonnables doivent être prises pour que ni les canalisations d'eau et de gaz, ni les autres circuits électriques, ni les courants qui y circulent n'en soient affectés gravement. On laisse au *Board of Trade* le soin de formuler, à cet effet, des règlements sanctionnés par des pénalités, en ayant toutefois égard à la dépense qui incomberait à l'entreprise, et aux conséquences qui pourraient en résulter pour son avenir commercial. Enfin les entrepreneurs qui emploient de forts courants doivent aviser *deux ans* à l'avance les possesseurs de circuits dans lesquels circulent de faibles courants, pour que ces derniers prennent toutes les précautions nécessaires pour se protéger.

La solution adoptée par la commission est une solution mixte. La commission préfère le retour par fil isolé, mais elle tolère le retour par fil nu pourvu que

(*) *Electric Review*, n° 817.

celui-ci ait une faible résistance. Cette expression « faible résistance » peut donner lieu à bien des interprétations. La commission spécifie, il est vrai, que le fil de retour, s'il est en contact avec le sol, doit avoir une section et une résistances telles qu'il ne se produise pas une différence de potentiel suffisante pour donner lieu à une perte à la terre dangereuse. Mais qu'entend-on par une perte à la terre dangereuse ? En somme, la commission indique dans quel sens la réglementation doit être faite ; elle ne peut prévoir les changements quotidiens qu'apporteront et la pratique et le progrès de la science ; elle laisse au *Board of Trade* le soin de rester d'accord avec eux au moyen de règlements successifs.

La commission a donc estimé que la terre, au point de vue électrique, appartenait à tous. Chacun peut s'en servir à condition de respecter le droit de ses voisins. La commission oblige les entreprises qui envoient dans le sol des courants forts, à leur frayer un chemin tel, qu'ils affectent le moins possible les conducteurs dans lesquels circulent des courants moins énergiques et, par contre, elle invite les entreprises qui emploient des courants faibles à se protéger de leur côté contre leurs dangereux voisins.

Aux unes comme aux autres, elle impose des frais, mais cette répartition est équitable, et les conclusions de la commission constituent, en somme, un succès pour la *Traction électrique*.

CHRONIQUE.

Procédé pour réaliser de grandes résistances.

Dans les diverses expériences électriques, on a souvent besoin de grandes résistances. Et il n'est pas toujours facile de les réaliser commodément. Les résistances en fil de métal demandent de très grandes longueurs de fils, longueurs qui se chiffrent par kilomètres. On a essayé aussi de tracer sur des plaques de verre ou d'ébonite des traits de crayon; mais ces dernières résistances sont fragiles et sujettes à changer. M. E. Jona, à Milan, a récemment fait connaître la disposition qu'il employait pour obtenir de grandes résistances.

Un cylindre en ébonite est couvert concentriquement avec une pâte composée de pâte d'ébonite ordinaire, non encore vulcanisée, mélangée intimement avec du noir de fumée. On soumet ensuite le tout à la vulcanisation ; ce qui a pour but de faire adhérer les deux espèces d'ébonite en les soudant l'une à l'autre. On travaille après au tour le manchon extérieur; on l'amincit au milieu, et l'on fait aux extrémités des pas de vis dans lesquels on fixe des garnitures en bronze qui servent de prises de courant. De la sorte, on a un cylindre creux en ébonite semi-conductrice, aux parois très minces, une résistance d'environ 1 méghom sur une longueur de 10 centimètres avec un diamètre de 15 millimètres. On peut encore avoir de plus grandes résistances en filetant la partie centrale. On obtient ainsi un filet dont la partie supérieure est en ébonite semi-conductrice, et dont l'autre partie est en ébonite isolante. Pour faire les prises de courant aux extrémités, on peut, enfin, insérer dans la pâte, à chaque extrémité, et avant la vulcanisation, une hélice en fil de fer, et vulcaniser ensuite; les bouts de chaque hélice servent de prise de courant.

(*La Nature.*)

L'étalon de lumière.

L'Institut impérial de physique, à Berlin, vient de présenter un rapport sur l'usage du platine en fusion comme étalon de lumière.

On sait que ce fut Violle qui proposa le premier comme unité de lumière la quantité de lumière fournie par un centimètre carré de platine fondu au moment de sa solidification. L'inconvénient de cette méthode, c'est que, pour tenir le platine absolument pur et avoir une surface propre et lisse, il faut opérer sur de grandes quantités de métal. Siemens proposa ensuite le platine en feuille au moment de sa fusion; mais l'expérience montra que des variations atteignant jusqu'à 10 p. 100 étaient très fréquentes, surtout à cause du déchirement de la feuille au moment de la fusion.

L'Institut de physique de Berlin a essayé de fixer la température du platine, indépendamment de son point de fusion. Il a été constaté que, à une température donnée, la proportion de la lumière totale à celle transmise par une couche d'eau d'une certaine épaisseur était toujours de 2 p. 100 pour des plaques de platine d'épaisseurs diverses et de mesures différentes. Pour mesurer les quantités de lumière, un bolomètre très délicat a été construit. Un morceau de platine fut soudé à un morceau d'argent dix fois plus épais, et la plaque ainsi formée fut passée dans un laminoir en cuivre qui en ramena l'épaisseur à 1/100 de millimètre. Elle fut coupée en bandes de 1 millimètre de largeur qui furent débarrassées de l'argent, de sorte que, finalement, leur épaisseur se trouva réduite à 1/1000 de millimètre.

L'Institut étudie maintenant l'action absorbante de l'eau et du récipient en quartz qui la contient. Il étudie aussi l'effet des impuretés du platine.

(*Bulletin international de l'Électricité.*)

Une pile piézo-électrique.

Par lord Kelvin.

Lord Kelvin a présenté dernièrement à la « British Association » un appareil qui offre une curieuse propriété qui n'avait

guère été qu'entrevue jusqu'ici, mais jamais avec des résultats aussi nets. Il s'agit d'une pile constituée par des couples métalliques et qui donne une quantité définie d'électricité quand on la soumet à une pression définie. C'est tout à fait l'analogue des quartz piézo-électriques de M. Curie.

La pile de lord Kelvin consiste en 24 couples de zinc-cuivre, soudés entre eux. Chaque lame consiste en un carré de 8 centimètres de côté et on a enlevé sur chaque plaque de zinc les quatre coins, de manière à découvrir une surface d'un demi-centimètre de cuivre.

On sépare les couples en les posant sur de petites pièces d'ébonite qui reposent sur les parties de cuivre ainsi découvertes et qui, par conséquent, ne touchent pas les zincs. L'espace d'air ainsi ménagé entre les cuivres et zincs successifs peut avoir une épaisseur quelconque, depuis un demi-millimètre jusqu'à 3 ou 4 millimètres.

Pour observer la production de l'électricité par la pression, on relie les deux plaques extrêmes à un électromètre à quadrant, en ayant soin de les relier d'abord métalliquement pour éviter une charge accidentelle. Si, après avoir rompu cette communication, on laisse tomber d'une hauteur de quelques millimètres un poids de quelques kilogrammes sur la plaque supérieure, on voit immédiatement l'aiguille de l'électromètre dévier et conserver ensuite une déflection déterminée, si l'isolation des petits supports d'ébonite est suffisante.

Si les plaques de zinc sont disposées au-dessus des cuivres, c'est l'électricité positive qui s'y porte.

(*Électricien.*)

TABLE DES MATIÈRES.

TOME XX. — ANNÉE 1893.

Numéro de Janvier-Février.

Numéro de Mars-Avril.

Numéro de Mai-Juin.

Numéro de Juillet-Août.

Numéro de Septembre-Octobre.

Numéro de Novembre-Décembre.

TABLE ALPHABÉTIQUE ET SIGNALÉTIQUE
DES MATIÈRES.

TOME XX. — ANNÉE 1893.

A

B

C

FIN DES TABLES.

L'Éd.-Gérant. DUNOD. — PARIS — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

FIN DES TABLES.

L'Éd.-Gérant, DUNOD. — PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

PARIS — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

